

## THÈSE

*Présentée à*

L'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard  
en vue de l'obtention du titre de  
Docteur

*par*

DAVID BOUQUAIN  
Enseignant Chercheur à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard  
Laboratoire Systèmes et Transports

CONTRIBUTION À LA MODÉLISATION ET À  
L'OPTIMISATION DES ARCHITECTURES DE VÉHICULES  
HYBRIDES

le 3 décembre 2008

### MEMBRES DU JURY :

M. MOHAMED EL HACHEMI BENBOUZID	Université de Brest
M. PASCAL BROCHET	Ecole Centrale de Lille
M. MAURIZIO CIRRINCIONE	Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
M. MOHAMED GABSI	Ecole Normale Supérieure de Cachan
M. DIDIER GARRET	Alstom Transport
M. ABDELLATIF MIRAOUI	Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
M. CORNEL STAN	West Saxon University of Zwickau

David Bouquain : *Contribution à la modélisation et à l'optimisation des architectures de véhicules hybrides*, Thèse de Doctorat, le 3 décembre 2008

## RESUMÉ

---

Les véhicules électriques et hybrides sont constitués de différents composants et organes : la (ou les) source d'énergie, son stockage et sa conversion, la (ou les) motorisation, la transmission mécanique et/ou électronique (pour les véhicules complètement électriques), la commande et la gestion des différents composants (outils de commande, cartes électroniques, bus véhiculant la puissance et l'information)... Chaque organe possède sa propre physique mais également une dynamique appropriée. Il constitue à lui seul un sous système nécessitant ainsi une approche de modélisation et de simulation bien particulière.

La première partie de ce mémoire propose de faire un état de l'art des diverses solutions électriques et hybrides existantes en prenant comme base le véhicule à combustion interne classique placé dans son contexte environnemental. Les différents moyens de stockage de l'énergie électrique sont exposés et comparés. Une introduction à la pile à combustible est présentée.

Un des objectifs de ce sujet était la participation au développement d'un outil de dimensionnement énergétique intégré et modulaire, basé sur des modèles physiques dont la précision est à plusieurs niveaux selon l'usage. Cet outil doit servir à terme à l'optimisation, au dimensionnement et à la conception des architectures hybrides par une approche de prototypage virtuel.

La mise en place de bancs d'essais modulaires a permis d'évaluer différentes technologies dans le domaine des motorisations électriques et hybrides. En effet, l'une des approches actuellement développées au laboratoire consiste à comparer différentes architectures en fonction des technologies disponibles dans l'objectif d'optimiser des chaînes de motorisations des véhicules. De plus, ces outils ont permis de valider des modèles numériques des composants ainsi que les lois de gestion d'énergie.

La dernière partie montre les nombreux résultats de simulations et d'expérimentations obtenus validant ainsi nos méthodes de conception et de modélisation.



## ABSTRACT

---

Electric and hybrid vehicles are made up of different components and organs : the energy sources with there storage and conversion systems, the thermal engines, the mechanical transmissions, the power converters, the control and management of the components (software tools, electronic boards, electrical bus carrying power and information) ... Each element has its own physical behavior with different dynamics.

The first part of this thesis presents a state of the art of the electric and hybrid solutions placed in the environmental context. The different ways for the storage of the electrical energy are described and compared. An introduction to the fuel cell is presented.

One objective of this work was the contribution to the development of an integrated design tool, based on physical models whose accuracy is at several levels depending on usage. This tool should be used for optimization, sizing and design of hybrid architectures by using virtual prototyping.

The construction of modular test benches allowed us to evaluate different technologies in the field of electrical and hybrid systems. Indeed, one of the approaches being developed in the SeT laboratory is to compare different architectures in terms of available technology in order to optimize the power train of the vehicles. More, these tools were used to validate the numerical models of the components and the laws of energy management.

The last part presents the results of numerous simulations and experiments performed. These results have validated our design and modeling methods.



## TABLE DES MATIÈRES

---

REMERCIEMENTS	xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1 ÉTAT DE L'ART DES SOLUTIONS HYBRIDES ET ÉLECTRIQUES EXISTANTES	5
1.1 Introduction	5
1.1.1 Pollution de l'air liée à l'automobile	5
1.1.2 Le réchauffement climatique	8
1.1.3 Ressources en pétrole	8
1.2 Présentation des véhicules thermiques, électriques et hybrides	12
1.2.1 Architecture du véhicule	12
1.2.2 Profil routier	13
1.2.3 Le véhicule thermique	16
1.2.4 Le véhicule électrique	19
1.2.5 Le véhicule hybride	23
1.2.6 Véhicule à pile à combustible : un hybride électrique	35
1.3 Stockage de l'énergie électrique	40
1.3.1 Les batteries	40
1.3.2 Les supercondensateurs	49
1.4 Conclusion	54
2 PRÉSENTATION ET DIMENSIONNEMENT DES SYSTÈMES ÉTUDIÉS	55
2.1 Introduction	55
2.2 Fauteuil roulant électrique hybride pile à combustible et batterie	55
2.2.1 Description du système	55
2.3 Banc d'essai hybride	59
2.3.1 Présentation	59
2.3.2 Description du banc	62
2.3.3 Dimensionnement et choix des composants	65
2.3.4 Les capteurs	74
2.3.5 Contrôle du système et prototypage rapide	74
2.4 Conclusion	79
3 MODÉLISATION ET CARACTÉRISATION DES ÉLÉMENTS DES SYSTÈMES HYBRIDES	81
3.1 Introduction	81
3.2 Modèle mécanique du véhicule	81
3.3 Modèle du moteur thermique	82
3.3.1 Variables normalisées	83
3.3.2 Efficacité du moteur	84
3.4 Caractérisation du moteur thermique	87

3.5	Modélisation du pack de supercondensateurs	88
3.5.1	Schéma équivalent électrique	88
3.5.2	Identification des paramètres du circuit équivalent	88
3.6	Batteries au plomb-acide	95
3.6.1	Tension en charge	95
3.6.2	Tension à vide	95
3.6.3	Capacité	95
3.6.4	Profondeur de décharge et état de charge	96
3.7	Pile à combustible	97
3.7.1	Modèle de la pile de 300 watts	97
3.7.2	Caractérisation de la pile	97
3.8	Machines électriques et convertisseurs associés	99
3.8.1	Moteur de traction et convertisseur associé	99
3.8.2	Génératrice et convertisseur associé	100
3.9	Charge mécanique	106
4	EXPÉRIMENTATION DE CHAÎNES DE TRACTIONS HYBRIDES	107
4.1	Fauteuil roulant électrique hybride pile à combustible et batterie	107
4.1.1	Contrôle	107
4.1.2	Simulations et résultats expérimentaux	109
4.1.3	Conclusion	112
4.2	Banc d'essai hybride	116
4.2.1	Association batteries et supercondensateurs	116
4.2.2	Cycle challenge SIA	120
4.2.3	Achitecture hybride série	122
4.2.4	Simulation de l'architecture batteries, supercondensateurs et moteur thermique	127
4.2.5	Conclusion	129
	CONCLUSION GÉNÉRALE	133
	BIBLIOGRAPHIE	135



## TABLE DES FIGURES

FIG. 1	Plateforme de conception d'architectures hybrides pour véhicules	3
FIG. 2	Principales sources d'émissions d'oxydes d'azote aux Etats Unis en 2002 [1]	6
FIG. 3	Brume due à la pollution automobile à New York en 1988 - Public Health Image Library	6
FIG. 4	Mortalité due à la pollution à Londres en 1952 [24]	7
FIG. 5	Evolution de la concentration dans l'atmosphère des principaux gaz à effet de serre [16]	9
FIG. 6	a) Émissions annuelles de gaz à effet de serre anthropiques dans le monde. b) Parts respectives des différents gaz à effet de serre anthropiques dans les émissions totales, en équivalent CO <sub>2</sub> . c) Contribution des différents secteurs aux émissions totales de gaz à effet de serre anthropiques en 2004, en équivalent CO <sub>2</sub> [16]	10
FIG. 7	Evolution du cours du baril de pétrole de 1970 à nos jours - source AFP	11
FIG. 8	Ecorché d'un véhicule - source PSA	13
FIG. 9	Cycle urbain utilisé par l'agence de protection de l'environnement des Etats Unis [28]	14
FIG. 10	Cycle autoroutier en dessous de 60 mph utilisé par l'agence de protection de l'environnement des Etats Unis [28]	14
FIG. 11	Cycle urbain utilisé par l'Union Européenne[28]	15
FIG. 12	Cycle extra-urbain utilisé par l'Union Européenne [28]	15
FIG. 13	Cycle extra-urbain pour véhicule de faible puissance utilisé par l'Union Européenne [28]	16
FIG. 14	Coupe d'un moteur 4 cylindres - source PSA	17
FIG. 15	Cycle à quatre temps	18
FIG. 16	Principe de transformation du pétrole en carburant	19
FIG. 17	La «Jamais contente» qui est la première voiture à passer les 100km/h - source Wikimedia Commons	20
FIG. 18	Architecture d'un véhicule électrique	21
FIG. 19	Exemple du Berlingo électrique de Citroën	22
FIG. 20	Alternateur-démarrateur Valéo [27]	24
FIG. 21	Système mild hybrid Siemens	25
FIG. 22	Architecture hybride série	26
FIG. 23	Les différentes phases de fonctionnement de l'architecture hybride série	28
FIG. 24	Architecture hybride parallèle	29
FIG. 25	Les différentes phases de fonctionnement de l'architecture hybride parallèle	30

FIG. 26	Architecture hybride parallèle avec moteurs électriques sur l'essieu arrière	31
FIG. 27	Véhicule C-Métisse de Citroën à moteurs-roues électriques [29]	31
FIG. 28	Architecture hybride à dérivation de puissance	32
FIG. 29	Les différentes phases de fonctionnement de l'architecture hybride parallèle à dérivation de puissance	33
FIG. 30	Principe de fonctionnement de la transmission à dérivation de puissance	34
FIG. 31	Schéma de principe d'une pile à combustible [7]	36
FIG. 32	Schéma de principe d'une pile à combustible - source PSA	38
FIG. 33	Schéma de principe de l'association pile à combustible et batteries	38
FIG. 34	207 Epure : association pile à combustible et batterie Li-Ion - source PSA	39
FIG. 35	Schéma de principe de l'association pile à combustible et supercondensateurs	40
FIG. 36	Plage de fonctionnement en tension d'un élément électrochimique	41
FIG. 37	Evolution de la tension en fonction de la capacité restante en fonction du régime de décharge	43
FIG. 38	Diagramme de Ragone comparant les caractéristiques des supercondensateurs à d'autres composants de stockage d'énergie	50
FIG. 39	Exemple de répartition de la puissance fournie par des batteries et des supercondensateurs	51
FIG. 40	Structure interne d'un supercondensateur [17]	52
FIG. 41	Fauteuil roulant prototype	56
FIG. 42	Pile à combustible PEFC 300 W	56
FIG. 43	Architecture interne du fauteuil roulant	57
FIG. 44	Banc de test du système pile à combustible	58
FIG. 45	Fauteuil roulant hybride en cours de montage	59
FIG. 46	CAO du banc d'essai hybride	60
FIG. 47	Banc d'essai construit	61
FIG. 48	Architecture série	64
FIG. 49	Architecture parallèle	64
FIG. 50	Redresseur MLI	67
FIG. 51	Association redresseur et hacheur	67
FIG. 52	Variation de l'énergie disponible dans un supercondensateur en fonction de $d$	71
FIG. 53	Hacheur associé aux supercondensateurs	74
FIG. 54	Architecture interne de la carte DS1103	76
FIG. 55	Principe du prototypage rapide	78
FIG. 56	Bilan des forces sur le véhicule	81
FIG. 57	Représentation du modèle du moteur thermique	86
FIG. 58	Comparaison entre la documentation constructeur et le modèle de la consommation du moteur à couple maximal	87
FIG. 59	Courbes d'iso-rendement du moteur thermique	88
FIG. 60	Modèles équivalents d'un supercondensateur	89

FIG. 61	Identification graphique des éléments du schéma équivalent pour un échelon de 49 ampères	90
FIG. 62	Comparaison entre la tension simulée et la tension expérimentale du banc de supercondensateurs	94
FIG. 63	Modèle équivalent électrique simple d'une batterie	95
FIG. 64	Courbes de polarisation de la pile à combustible 300 W	98
FIG. 65	Approximation de Willans du moteur d'entraînement et du convertisseur associé	100
FIG. 66	Couple du moteur électrique d'entraînement en fonction de la puissance mécanique et de la vitesse de rotation	101
FIG. 67	Rendement du moteur électrique d'entraînement en fonction de la puissance mécanique et de la vitesse de rotation	102
FIG. 68	Approximation de Willans de la génératrice et des convertisseurs associés	103
FIG. 69	Couple de la génératrice en fonction de la puissance électrique et de la vitesse de rotation	104
FIG. 70	Rendement de la génératrice électrique et des convertisseurs associés en fonction de la puissance électrique et de la vitesse de rotation	105
FIG. 71	Capteurs de couple de la charge mécanique	106
FIG. 72	Stratégie de contrôle de la pile à combustible	107
FIG. 73	Stratégie de contrôle du système global	108
FIG. 74	Comparaison de la tension pile mesurée et calculée sur un cycle	110
FIG. 75	Comparaison de la tension batterie mesurée et simulée sur un cycle	110
FIG. 76	Courants de la pile à combustible pour différentes valeurs de $\tau$	111
FIG. 77	Courants de la batterie pour différentes valeurs de $\tau$	111
FIG. 78	Courants sur le bus continu pour $\tau = 2$ s	113
FIG. 79	Gestion de la température	114
FIG. 80	Gestion des purges	115
FIG. 81	Comparaison des énergies spécifiques et densités d'énergies entre batteries et la pile à combustible étudiée	115
FIG. 82	Cycle de référence	116
FIG. 83	Contrôle des supercondensateurs	117
FIG. 84	Courant batterie pour différentes valeurs de $\tau$	118
FIG. 85	Zoom sur le dernier cycle	118
FIG. 86	Tension du pack de supercondensateurs pour différentes valeur de $\tau$	119
FIG. 87	Courant supercondensateurs pour différentes valeur de $\tau$	119
FIG. 88	Cycle de référence	120
FIG. 89	Courant de la batterie	121
FIG. 90	Tensions batteries et supercondensateurs	121
FIG. 91	Courant supercondensateurs	122
FIG. 92	Vitesse et couple du moteur de traction	123
FIG. 93	Contrôle du générateur diesel - alimentation directe de la charge	123
FIG. 94	Courant bus dc, batterie, et générateur côté bus dc	124

FIG. 95	Contrôle du système hybride batterie et générateur diesel	125
FIG. 96	Courant bus dc, batterie, et générateur côté bus dc	125
FIG. 97	Contrôle du système hybride batterie, générateur diesel et supercondensateurs	126
FIG. 98	Courant batterie, générateur côté bus dc et supercondensateurs côté bus dc	127
FIG. 99	Tension de la batterie et du pack de supercondensateurs	128
FIG. 100	Comparaison des grandeurs communes à toutes les architectures hybrides	128
FIG. 101	Comparaison du couple du moteur thermique et du courant de la génératrice pour les trois architectures	130
FIG. 102	Comparaison du courant et de la tension batterie	131
FIG. 103	Comparaison des grandeurs liées aux supercondensateurs	132

## LISTE DES TABLEAUX

---

TAB. 1	Réserves de pétrole connues en 2000 et durées de ces réserves [23]	10
TAB. 2	Estimation des réserves de pétrole non découvertes en 2000 [23]	12
TAB. 3	Avantages et inconvénients du véhicule tout électrique	23
TAB. 4	Avantages et inconvénients des différentes architectures hybrides	32
TAB. 5	FEM et matériaux constituant les principaux accumulateurs électrochimiques [21]	42
TAB. 6	Paramètres nominaux d'une cellule au plomb [21]	44
TAB. 7	Paramètres nominaux d'une cellule nickel cadmium [21]	45
TAB. 8	Paramètres nominaux d'une cellule nickel métal hydrure [21]	46
TAB. 9	Paramètres nominaux d'une cellule sulfate de sodium [21]	47
TAB. 10	Paramètres nominaux d'une cellule Zebra [21]	47
TAB. 11	Paramètres d'une cellule lithium ion [21].	48
TAB. 12	Principales caractéristiques des batteries pour véhicule électrique [21]	49
TAB. 13	Spécifications techniques de supercapacité en cellule et en modules intégrés de la technologie Maxwell	53
TAB. 14	Combinaisons possibles proposées par le banc hybride	63
TAB. 15	Caractéristiques des capteurs utilisés	75
TAB. 16	Valeurs du modèle de friction pour un moteur diesel [18]	85

## REMERCIEMENTS

---

Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au Laboratoire Systèmes et Transports de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard au sein de l'équipe Commande et Conversion de l'Energie, sous la direction du Professeur Abdellatif Miraoui. Je tiens à lui exprimer mes plus sincères remerciements et ma gratitude pour la confiance qu'il m'a accordé.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers les membres du jury. Je remercie en premier lieu Monsieur Pascal Brochet, Professeur à l'Ecole Centrale de Lille de m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider ce jury. Je remercie vivement Monsieur Mohamed Gabsi, Professeur au Laboratoire SATIE de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan ainsi que Monsieur Mohamed El Hachemi Benbouzid, Professeur à l'IUT de Brest pour avoir accepté la charge de rapporteur. Je remercie également Monsieur Cornel Stan, Professeur de l'Université de Zwickau et Monsieur Maurizio Cirrincione, Professeur au Laboratoire Systèmes et Transports de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard d'avoir bien voulu examiner mon travail.

Je voudrais associer à ces remerciements mes collègues qui ont contribué à ce travail par leur apport scientifique et technique mais aussi pour l'excellente ambiance de travail qui règne dans notre équipe. Je remercie en particulier :

- Benjamin Blunier, pour son aide indispensable à la réalisation de ce travail. Sa maturité scientifique, sa faculté d'assimilation et sa persévérance en feront sans nul doute un brillant chercheur ;
- Damien Paire, pour son soutien, sa sympathie et son dynamisme. Sa disponibilité de tous les jours et son dévouement sont remarquables.

Enfin, ma plus grande reconnaissance s'adresse à Céline, mon épouse, pour son attention, sa compréhension et son soutien permanent ainsi qu'à mes deux enfants, Emilie et Baptiste. C'est à vous trois que je dédie cette thèse.



## INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

Le secteur des transports terrestres et en particulier celui de l'automobile connaît aujourd'hui de profonds changements. L'évolution de la société, de ces modes de vie et de ces besoins en termes de déplacements encourage l'apparition sur le marché automobile de nouvelles gammes de véhicules et de nouvelles technologies. Le panel de véhicules proposés par les constructeurs est maintenant extrêmement large. Cela va de la micro-citadine biplace destinée à faire quelques kilomètres par jour à la grosse berline avalant les kilomètres sur les autoroutes. Néanmoins, quel que soit le type de véhicule, on peut remarquer la constante croissance des exigences des clients en ce qui concerne l'agrément de conduite, la performance, la sécurité et les technologies embarquées. Il découle de ceci une tendance à l'augmentation constante du poids des véhicules [10].

D'autre part, les contraintes environnementales obligent de plus en plus les constructeurs et les équipementiers à développer de nouveaux groupes motopropulseurs et de nouvelles solutions technologiques. La diminution de la consommation en carburant des véhicules est le principal cheval de bataille des ingénieurs car celle-ci est directement liée aux émissions de CO<sub>2</sub> des moteurs. Il a été largement démontré que l'augmentation de la concentration de ce gaz dans l'atmosphère provoque inexorablement l'accroissement de l'effet de serre. Les émissions de polluants sont aussi dans le collimateur des instances européennes et mondiales. En particulier les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone ainsi que les particules émises par les moteurs diesels doivent diminuer afin de pouvoir répondre aux nouvelles normes de plus en plus sévères.

Les constructeurs automobiles sont donc confrontés à plusieurs contraintes contradictoires pour la conception des véhicules de demain. De plus, compte tenu de la concurrence qui règne sur le marché automobile, les innovations des bureaux d'études doivent avoir une réalité commerciale en phase avec les besoins du client tout en respectant l'évolution des normes environnementales. Le flop des premiers véhicules tout électrique commercialisés en France dans les années 90 est le parfait exemple de ce qu'il ne fallait pas faire : proposer une technologie «propre» mais aux performances trop modestes et non rentable économiquement.

Les véhicules hybrides semblent actuellement constituer une voie possible permettant aux constructeurs de pouvoir répondre aux objectifs présentés ci-dessus. Les dernières innovations apportées sur les moteurs à combustion interne (injection directe, downsizing, gestion des auxiliaires moteur, mélanges pauvres, etc.) combinées aux progrès des machines électriques, des convertisseurs de puissance et de l'informatique industrielle font que cette technologie est maintenant mature. Il faut tout de même souligner que les contraintes industrielles restent présentes (maîtrise des coûts, nouveaux outils de production, nouveaux métiers...) ce qui conduira les constructeurs à rester prudents et à faire évoluer leurs véhicules par étapes. bien sûr tout le monde a en tête les véhicules hybrides commercialisés depuis plusieurs années par le leader mondial dans ce domaine qu'est Toyota. Mais il ne faut pas perdre de vue que cette réussite actuelle est le fruit d'un investissement financier colossal et de travaux de recherche démarrés il y a plus de 20 ans

avec une rentabilité qui se fera à très long terme.

Les véhicules hybrides sont constitués en général de l'association d'un moteur à combustion interne, d'un stockage d'énergie électrique réversible en courant et d'une ou plusieurs machines électriques. L'objectif est de tirer parti à chaque instant des avantages de chacune des solutions en fonction du point de fonctionnement du véhicule. Il est donc possible de profiter des performances des machines électriques (couple au démarrage, souplesse de fonctionnement, pas d'émissions, réversibilité des moteurs ...) lors des phases transitoires et de faire travailler le moteur thermique au meilleur rendement possible lors des paliers de puissance. L'autonomie globale reste néanmoins fixée par les performances du moteur thermique et par le volume de carburant embarqué.

L'équipe de recherche Commande et Conversion de l'Énergie du laboratoire SeT (Systèmes et Transports) de l'UTBM travaille depuis plusieurs années sur la thématique des véhicules électriques et hybrides en partenariat avec des industriels de renom. Les travaux du laboratoire portent actuellement sur la réalisation d'une plateforme de prototypage virtuel d'architectures de chaînes de traction. En effet, dans le but de développer les solutions du futur, toutes les configurations possibles ne peuvent être testées expérimentalement. Il est donc nécessaire de développer des outils permettant de simuler les nouvelles topologies.

La philosophie générale de cette plate-forme est présentée sur la figure 1. À partir d'un cahier des charges défini, on suit le cycle classique de conception en V en partant des spécifications générales pour descendre au choix technologique des composants. En parallèle, on réalise des simulations en combinant les composants en sous-système et les sous-systèmes en un système global.

La mise en place d'une plate-forme de prototypage virtuel nécessite, d'autre part la constitution de bibliothèques de composants et de systèmes. Il est nécessaire, dans la plupart des cas, de valider expérimentalement les modèles de composants. Nous avons donc choisi d'associer à la plateforme virtuelle une plateforme expérimentale permettant de tester et de caractériser les systèmes ou les composants. Plusieurs équipements sont à notre disposition au laboratoire tels qu'un banc d'essai pour véhicule électrique, un banc d'essai pour système pile à combustible (réalisé dans le cadre de l'institut FCLAB), une chambre d'essai CEM, un banc d'essai pour moteur électrique ou encore un futur banc de test pour supercondensateurs et accumulateurs associé à une enceinte climatique. Il manquait à ces outils un équipement permettant de valider des solutions hybrides pour l'automobile.

Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse visent d'une part à enrichir la bibliothèque de composants de la plateforme virtuelle et d'autre part la conception, la réalisation et la mise au point d'un banc de test et de validation d'architectures hybrides destinées au transport terrestre. Ce banc d'essai permettra de compléter la panoplie d'outils de tests et de caractérisation du laboratoire. De plus, dans le but de valider notre méthode de conception, nous avons choisi de réaliser un démonstrateur de fauteuil roulant hybride électrique combinant un système pile à combustible et une batterie de type Ni-Mh.

Nos travaux ont utilisé le HIL (*Hardware-in-The-Loop*). Le HIL (figure 1) permet de tester expérimentalement une partie du système global en prenant en considération les interactions avec l'ensemble des composants du système global. Dans ce dispositif, une partie du système est réelle et l'autre est simulée à partir des modèles. Cette dernière partie est



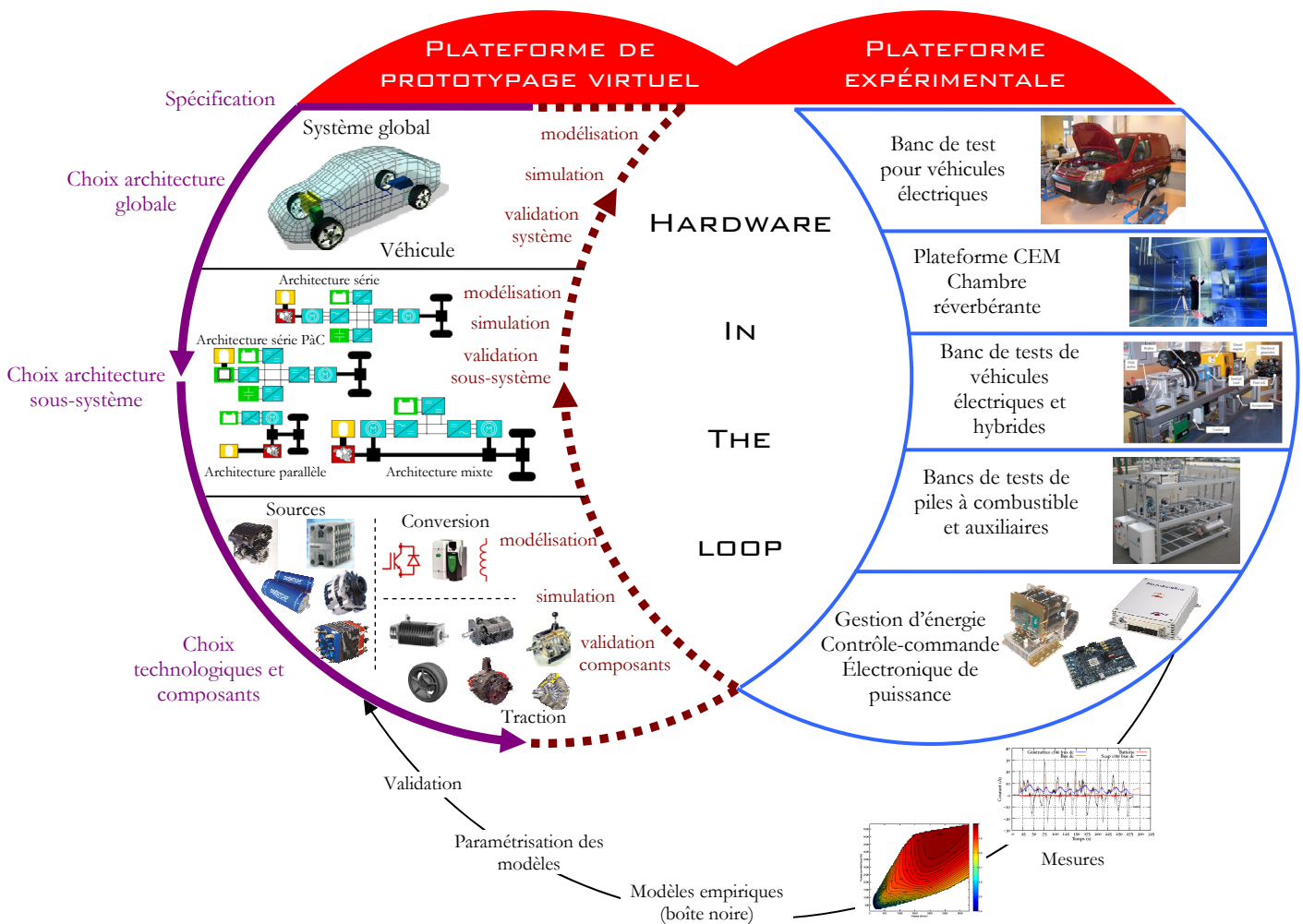


FIG. 1. Plateforme de conception d'architectures hybrides pour véhicules

émulée au moyen de composants spécifiques reproduisant le comportement de l'équipement virtuel. Par exemple, il est possible de reproduire le comportement d'un moteur à combustion interne sur banc en l'émulant par un moteur électrique associé à une commande adéquate. L'intérêt de ce procédé est encore amplifié grâce aux outils récents de prototypage rapide qui ont été aussi utilisés dans nos travaux.

Le mémoire suit le schéma de conception de la figure 1 en partant du système vers le composant (choix technologique et dimensionnement) et en remontant du composant au système (modélisation, validation et expérimentation). Il est composé de quatre chapitres.

Le premier chapitre se propose d'effectuer un état de l'art des solutions hybrides et électriques existantes placées dans un contexte environnemental. Les différents moyens de stockage de l'énergie électrique sont présentés. Ces dernières sont également accompagnés d'une introduction de la solution pile à combustible pour l'automobile.

Le deuxième chapitre expose les deux systèmes étudiés que sont le fauteuil roulant à pile à combustible ainsi que le banc d'essai hybride. Nous détaillons le dimensionnement des composants ainsi que leurs caractéristiques techniques.

Le troisième chapitre présente la modélisation et la caractérisation des différents matériels utilisés dans nos travaux. Nous avons utilisé en particulier des modèles comportementaux et analytiques validés par des expérimentations.

Enfin le dernier chapitre se consacre aux résultats de simulation ainsi qu'aux validations expérimentales des différentes topologies étudiées. Nous montrons ainsi le bien fondé de notre démarche de travail par la réalisation du démonstrateur de fauteuil roulant à pile à combustible et par l'achèvement du banc hybride.

# ÉTAT DE L'ART DES SOLUTIONS HYBRIDES ET ÉLECTRIQUES EXISTANTES

---

## 1.1 INTRODUCTION

Aujourd'hui, les véhicules à combustion interne et surtout les automobiles sont omniprésents dans notre vie. La voiture à moteur thermique est le moyen de déplacement individuel privilégié. La croissance du nombre de véhicules en circulation sur Terre est en forte augmentation depuis quelques années du fait du développement des pays asiatiques. Les experts scientifiques ont montré que les véhicules à combustion interne sont un des principaux responsables des troubles environnementaux. Le réchauffement de la planète, la dégradation de la qualité de l'air et la rapide diminution des réserves en pétrole rendent nécessaire la mise en œuvre de solutions alternatives au moteur à combustion interne.

Plusieurs actions sont menées par les constructeurs automobiles. En premier lieu, ils tentent de réduire la consommation des véhicules ainsi que les émissions de gaz à effet de serre, de polluants et de particules dans l'atmosphère. Une autre voie consiste à développer des solutions hybrides couplant les moteurs thermiques classiques à des moteurs électriques accompagnés d'un stockage d'énergie électrique réversible en courant (batteries ou supercondensateurs). Il ne faut pas oublier non plus le développement des véhicules tout électrique qui est entièrement tributaire des progrès attendus sur les accumulateurs électriques. Enfin des prototypes de véhicules alimentés par une pile à combustible sont maintenant légion mais sans réalité commerciale dans les 15 années à venir.

### 1.1.1 *Pollution de l'air liée à l'automobile*

Aujourd'hui, l'ensemble des véhicules utilise les hydrocarbures comme source d'énergie principale. Ils sont constitués en grande partie de carbone et d'hydrogène. Lors de la combustion, l'oxygène nécessaire à cette réaction se combine avec le carbone pour donner du dioxyde de carbone et l'hydrogène se combine avec l'oxygène pour donner de l'eau sous forme de vapeur. En cas de quantité d'oxygène trop faible, la combustion produit du monoxyde de carbone à la place du dioxyde de carbone. La combustion n'est jamais idéale. En plus du dioxyde de carbone et de l'eau, la combustion rejette des oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ), du monoxyde de carbone (CO) et des hydrocarbures non brûlés.

#### *Les oxydes d'azote et les hydrocarbures non brûlés*

Les oxydes d'azote proviennent de la réaction entre l'azote et l'oxygène de l'air. Théoriquement l'azote est un gaz inerte. Mais les hautes températures et l'importante pression lors de la combustion permettent la réaction entre l'azote et l'oxygène. Comme le montre la figure 2, l'automobile est le principal émetteur d'oxyde d'azote.

Les hydrocarbures non brûlés résultent de leur combustion incomplète. Certains de ces hydrocarbures non brûlés sont des poisons ou des produits chimiques cancérigènes tel que le benzène.

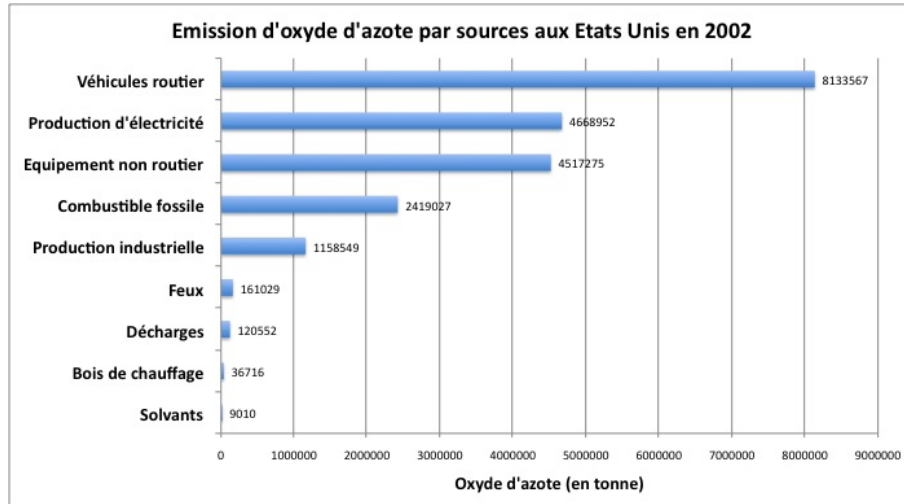


FIG. 2. Principales sources d'émissions d'oxydes d'azote aux Etats Unis en 2002 [1]

Les oxydes d'azote sont avec les hydrocarbures non brûlés les principaux composants impliqués dans la formation d'ozone au sol lors des périodes de forte chaleur principalement dans les agglomérations (voile laiteux visible dans les grandes villes). En effet, les ultraviolets du soleil réagissent avec les particules d'hydrocarbures non brûlés et les oxydes d'azote pour former l'ozone qui est un gaz incolore et dangereux. C'est un poison qui attaque les membranes des cellules (Figures 3 et 4).



FIG. 3. Brume due à la pollution automobile à New York en 1988 - Public Health Image Library

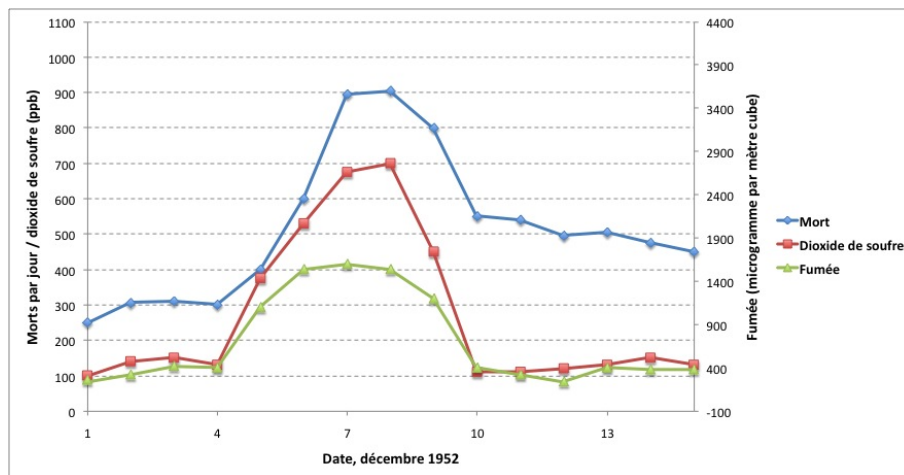


FIG. 4. Mortalité due à la pollution à Londres en 1952 [24]

### *Le monoxyde de carbone*

Le monoxyde de carbone résulte de la combustion incomplète des hydrocarbures due à un manque de dioxygène. Ce gaz est incolore et inodore. C'est un poison pour l'Homme et les animaux. Le monoxyde de carbone se fixe sur les globules rouges à la place de l'oxygène. Chez les personnes en bonne santé et à très faible concentration, le monoxyde de carbone entraîne de la fatigue et des douleurs à la poitrine. Chez les personnes atteintes de maladies cardiaques, il entraîne en plus des troubles de la vision et de la coordination, maux de tête, étourdissements, confusion, nausées. A plus forte concentration, le monoxyde de carbone est mortel. Le monoxyde de carbone forme de la carboxyhémoglobine dans le sang qui inhibe l'apport d'oxygène.

L'apparition des pots catalytiques a permis de diminuer considérablement les émissions de  $NO_x$  et de  $CO$ . Néanmoins, il est efficace uniquement à haute température ( $400^\circ C$ ) ce qui n'est donc pas compatible avec les petits trajets urbains.

### *Autres polluants*

Des impuretés dans les hydrocarbures entraînent le rejet d'autres polluants. Majoritairement, ce sont des sulfures contenus dans le diesel, kérosène et le gaz naturel. De la combustion des sulfures résultent des oxydes de soufre ( $SO_x$ ). Le dioxyde de soufre est responsable des pluies acides. Il entraîne des troubles respiratoires particulièrement chez les enfants et les personnes âgées et aggrave les problèmes cardiaques. Les pollutions engendrées par le dioxyde de soufre ne restent pas concentrées sur leurs lieux de production. La pollution au dioxyde de soufre peut migrer sur de grandes distances.

Les moteurs diesels rejettent des particules de suies dans l'atmosphère qui sont cancérogènes. Le filtre à particule est un palliatif à ce phénomène mais il n'équipe pas encore tout les véhicules fonctionnant au gasoil [25]. Il est de plus gourmand en énergie ce qui augmente la production de ( $NO_x$ ) et de ( $CO_2$ ).

On trouve également du plomb parmi les produits rejetés par le moteur à combustion

interne. Le plomb est la cause du saturnisme qui est un trouble neuronal. Aujourd'hui, le plomb est interdit dans les carburants dans les pays développés et est remplacé par d'autres produits chimiques.

### 1.1.2 *Le réchauffement climatique*

La dernière décennie a été la plus chaude depuis que l'Homme effectue des relevés instrumentaux de température à la surface de la terre (1850). Au cours du XX<sup>ème</sup> siècle, la température moyenne a augmenté de 0,6°C. Les températures ont augmenté presque partout dans le monde mais de façon plus importante dans la partie supérieure de l'Hémisphère Nord. Le réchauffement climatique est le résultat de l'effet de serre induit par l'augmentation de la présence de dioxyde de carbone, de méthane et d'autres gaz dans l'atmosphère. Ces gaz piègent les rayonnements du soleil réfléchis par la Terre. L'augmentation de la température sur Terre entraîne un dérèglement des écosystèmes.

La hausse des températures relevées depuis 1850 coïncide avec l'augmentation de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone, le méthane et le dioxyde d'azote. 13,1 % du CO<sub>2</sub> rejeté dans l'atmosphère par l'Homme est issu des transports (figures 5 et 6).

Les modèles du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) prédisent une importante augmentation des températures dans le siècle à venir de 0,3 à 6,4 °C suivant les scénarios retenus.

### 1.1.3 *Ressources en pétrole*

Le pétrole est le résultat de la décomposition de matières vivantes sur plusieurs centaines de millions d'années. Du fait de son processus de fabrication, le pétrole est une matière dite fossile. Les stocks ne sont donc pas inépuisables et la consommation que l'Homme fait du pétrole entraîne une rapide diminution des stocks (figure 2).

La hausse du prix du pétrole résulte de la variation de l'équilibre entre l'offre et la demande. Alors que les besoins en pétrole continuent à s'accroître à un rythme élevé (croissance économique des pays émergents tels que la Chine et l'Inde par exemple), l'approvisionnement a du mal à suivre la demande. L'équilibrage entre consommation et production s'opère donc par un renchérissement des produits pétroliers. Pour faire face à la diminution des réserves en pétrole, les constructeurs automobiles doivent mettre au point des véhicules plus économes avec un objectif final étant de pouvoir se passer de pétrole pour alimenter les moteurs.

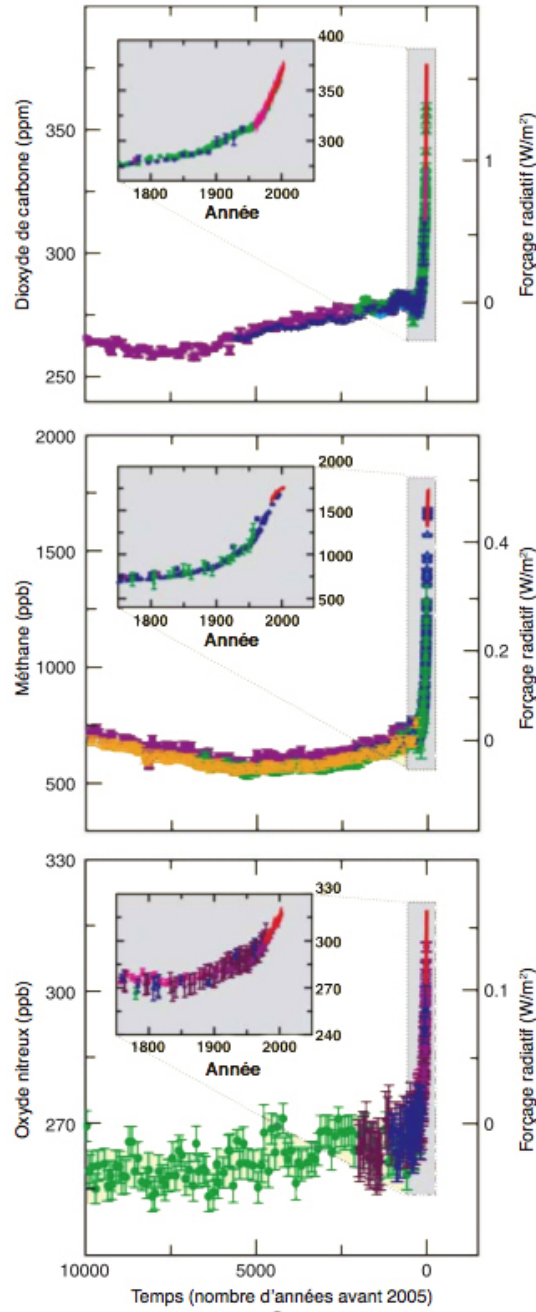


FIG. 5. Evolution de la concentration dans l'atmosphère des principaux gaz à effet de serre [16]

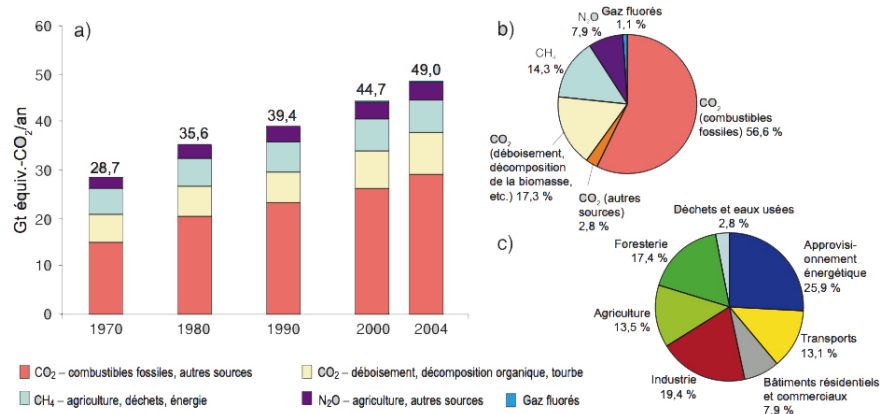
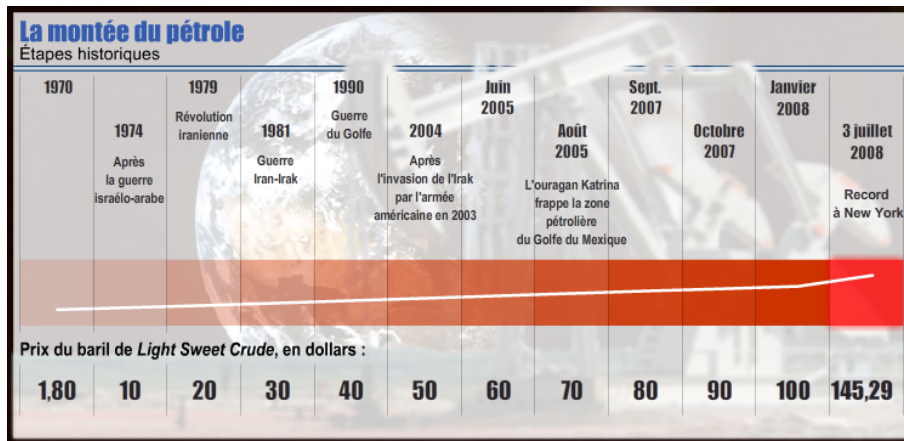


FIG. 6. a) Émissions annuelles de gaz à effet de serre anthropiques dans le monde. b) Parts respectives des différents gaz à effet de serre anthropiques dans les émissions totales, en équivalent CO<sub>2</sub>. c) Contribution des différents secteurs aux émissions totales de gaz à effet de serre anthropiques en 2004, en équivalent CO<sub>2</sub> [16]

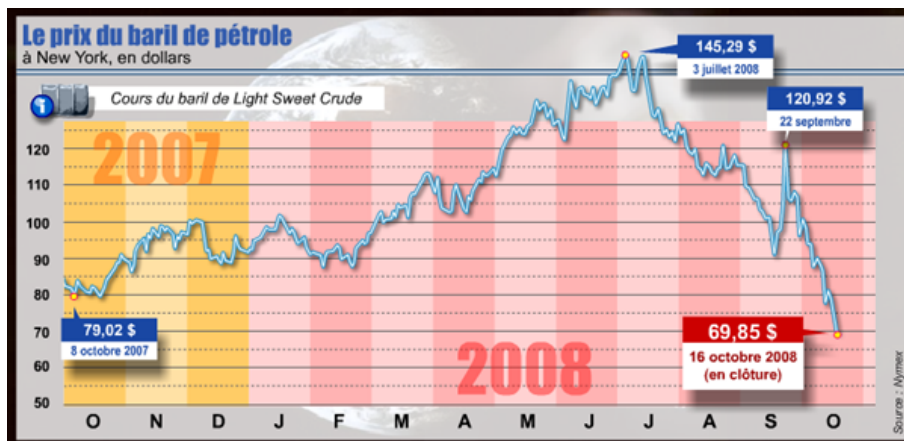
Région	Réserves connues en 2000 en milliards de tonnes	Années d'exploitation restantes
Amérique du Nord	8,5	13,8
Amérique Centrale et du Sud	13,6	39,1
Europe	2,5	7,7
Afrique	10	26,8
Moyen Orient	92,5	83,2
Russie	9	22,7
Asie Pacifique	6	15,6
<b>Total sur Terre</b>	<b>142,1</b>	<b>39,9</b>

TAB. 1. Réserves de pétrole connues en 2000 et durées de ces réserves [23]





(a)



(b)

FIG. 7. Evolution du cours du baril de pétrole de 1970 à nos jours - source AFP

Région	Réserves non découvertes en 2000 en milliards de tonnes
Amérique du Nord	19,8
Amérique Centrale et du Sud	14,3
Europe	3,0
Afrique	9,7
Moyen Orient	31,2
Russie	15,7
Asie Pacifique	4,0
Total sur Terre	98,3 (91,5)

TAB. 2. Estimation des réserves de pétrole non découvertes en 2000 [23]

## 1.2 PRÉSENTATION DES VÉHICULES THERMIQUES, ÉLECTRIQUES ET HYBRIDES

### 1.2.1 Architecture du véhicule

Qu'ils soient à propulsion thermique, hybride ou électrique, les véhicules automobiles ont une architecture commune à tous les constructeurs automobiles. La vue éclatée de la figure 8 présente les principaux éléments constitutifs d'une automobile moderne. Une coque autoporteuse en acier constitue le squelette de la voiture. Le groupe motopropulseur se situe en général à l'avant (ou à l'arrière pour certains modèles sportifs haut de gamme) et repose sur un berceau monté sur la coque via des silentbloks destinés à amortir les vibrations. Le groupe motopropulseur est constitué du moteur thermique (ou autre) associé à sa transmission (embrayage, boîte de vitesse et différentiel). Viennent ensuite les trains roulants regroupant les roues, les freins et les suspensions. La grande majorité des automobiles sont des tractions ce qui signifie que seules les roues avant sont motrices. On trouve aussi couramment des véhicules à propulsions (roue motrices à l'arrière) permettant de favoriser la motricité sur des véhicules puissants. Les architectures à quatre roues motrices, destinées il y a quelques années aux véhicules tout terrain, sont de plus en plus utilisées sur les SUV (Sport Utility Vehicle). Cette architecture est celle qui offre la meilleure motricité dans tous les cas de figure mais elle est en générale superflue pour une utilisation normale du véhicule.

Pour faire évoluer leurs véhicules vers des solutions hybrides, électriques ou autres, les constructeurs ont choisi de partir sur la même architecture que celle des véhicules conventionnels [20]. En effet c'est la solution la plus pragmatique qui permet de s'af-

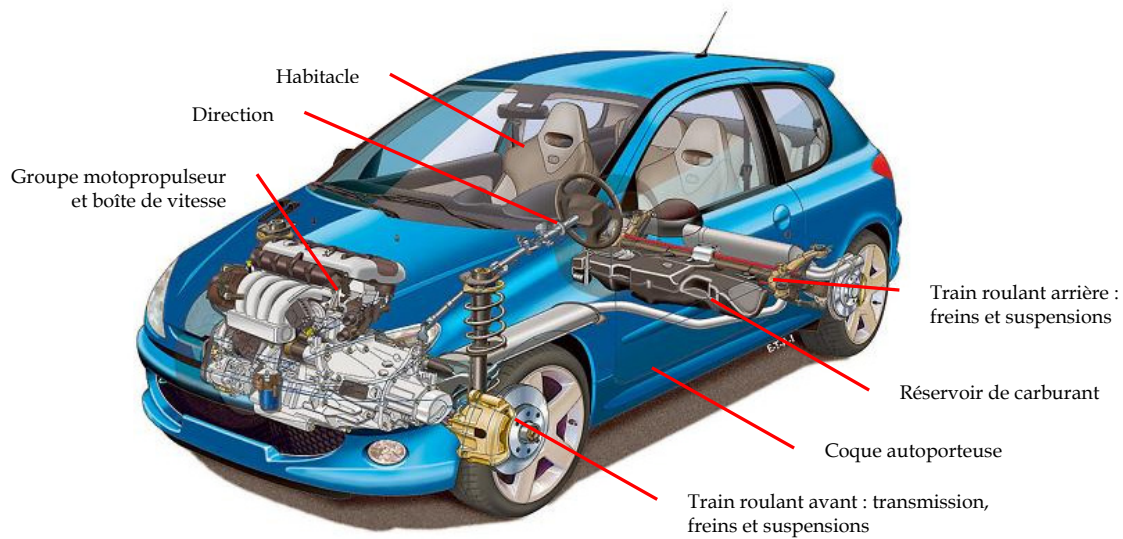


FIG. 8. Ecorché d'un véhicule - source PSA

franchir d'investissements coûteux. Le coût de renouvellement d'un modèle, en partant d'une base connue appelée plateforme, est de l'ordre d'un milliard d'euros pour une berline compacte. Bien sûr, il serait intéressant d'adapter la structure du véhicule en fonction des nouvelles technologies en voies de développement. On pourrait imaginer, par exemple dans le cas d'un véhicule tout électrique, d'utiliser quatre moteurs électriques répartis au plus près des roues en attaque directe et de stocker les batteries dans le plancher. Ceci permettrait de libérer un espace considérable pour les occupants. Mais le coût de développement de telles solutions serait exorbitant sachant que le véhicule devrait au moins avoir les mêmes performances en termes de sécurité et d'agrément. Le contexte économique actuel n'est pas favorable à cette mutation certes techniquement intéressante mais irréaliste pour l'instant.

### 1.2.2 Profil routier

Pour pouvoir comparer les performances des véhicules, des cycles routiers de référence donnant l'évolution de la vitesse en fonction du temps sont utilisés. Il en existe plusieurs types utilisés par les constructeurs mais aussi par les organismes fixant les normes de pollution. Par exemple aux Etats-Unis, des cycles ont été développés pour simuler un parcours urbain. C'est le cas du cycle figure 9 qui est un cycle urbain développé par le "Federal Urban Driving Schedule". Ce cycle est basé sur le trafic à Los Angeles. Il dure 1500 secondes, avec un pas d'une seconde. Le cycle présenté en figure 10 est un cycle extra-urbain. La vitesse est limitée à 70 mph. L'agence de protection de l'environnement de l'Etat de Californie a développé aussi des cycles spécifiques afin de déterminer la pollution engendrée par les véhicules.

L'Union Européenne a développé également des cycles urbains et extra-urbains. Le

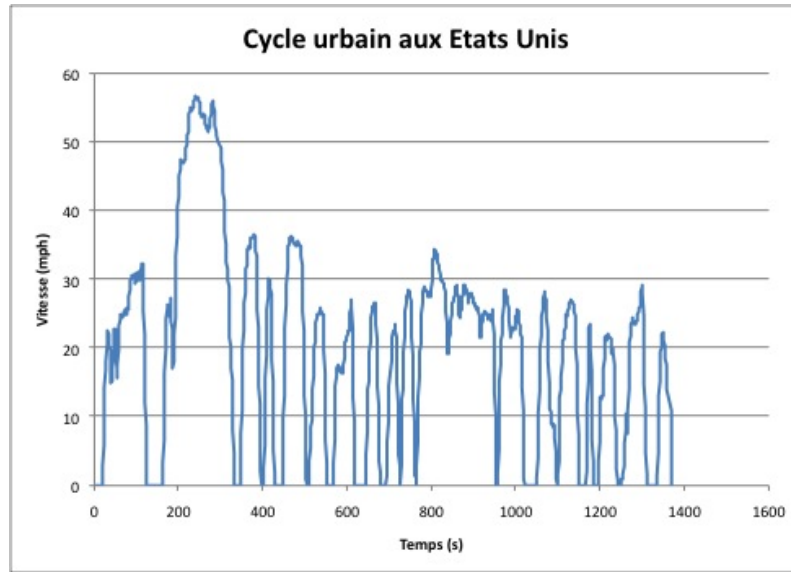


FIG. 9. Cycle urbain utilisé par l'agence de protection de l'environnement des Etats Unis [28]

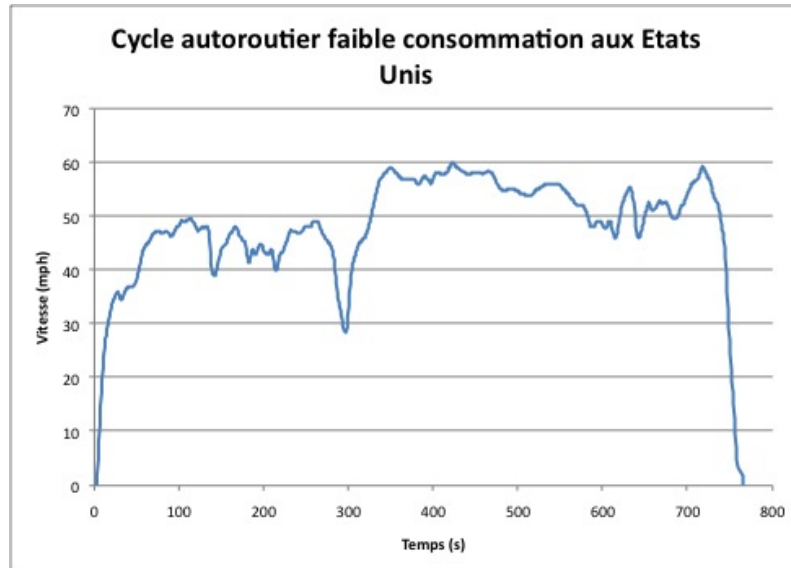


FIG. 10. Cycle autoroutier en dessous de 60 mph utilisé par l'agence de protection de l'environnement des Etats Unis [28]

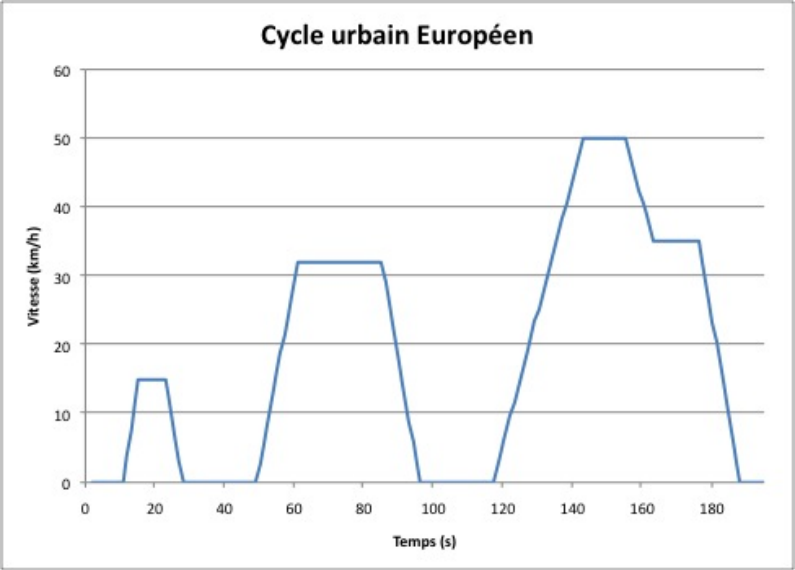


FIG. 11. Cycle urbain utilisé par l'Union Européenne[28]

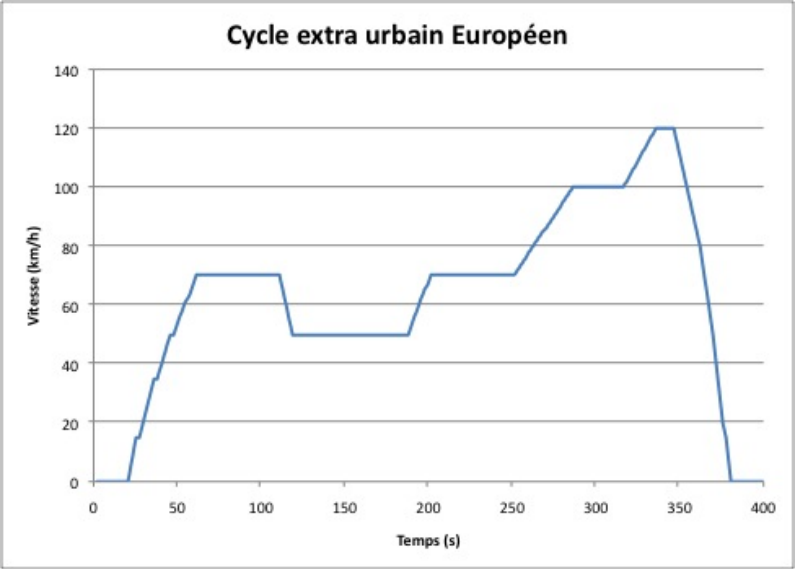


FIG. 12. Cycle extra-urbain utilisé par l'Union Européenne [28]

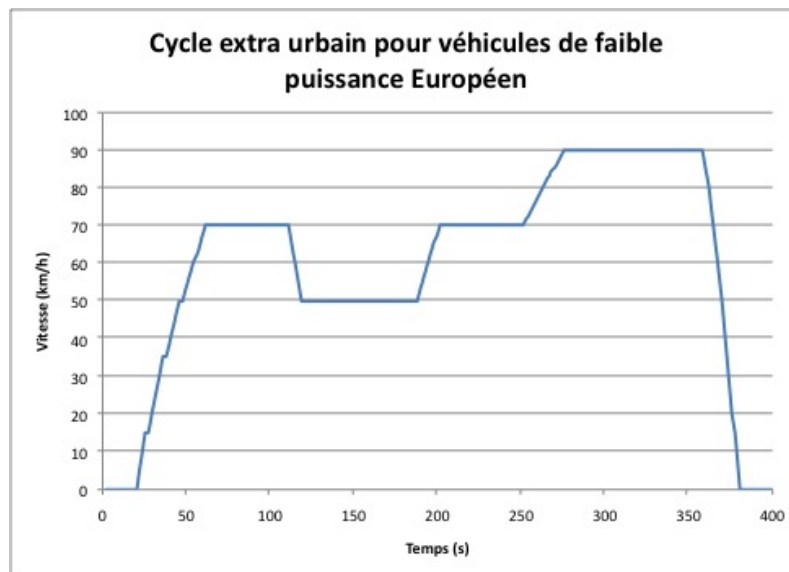


FIG. 13. Cycle extra-urbain pour véhicule de faible puissance utilisé par l'Union Européenne [28]

cycle figure 11 représente un cycle urbain, le cycle figure 12 représente un cycle extra-urbain et le cycle figure 13 représente un cycle extra-urbain pour un véhicule de faible puissance. Ces cycles sont bien plus simples que les cycles utilisés par l'Agence de Protection de l'Environnement des États-Unis. Les cycles développés par le Japon sont construits de la même façon que les cycles européens : des vitesses constantes et des accélérations constantes sur des périodes de plusieurs secondes. Ces cycles sont loin d'être représentatifs de l'utilisation réelle des véhicules et cela explique les consommations très faibles des véhicules affichées par les constructeurs dans leurs prospectus commerciaux. Néanmoins ils ont le mérite d'exister et de constituer une référence pour tous les constructeurs européens.

### 1.2.3 Le véhicule thermique

#### *Le moteur à combustion interne à quatre temps*

Les moteurs dits à quatre temps sont aujourd'hui omniprésents dans les véhicules. Cette architecture de moteur a fait largement ses preuves car c'est la solution qui offre aujourd'hui le meilleur compromis en termes de performances, pollution et longévité. L'essence, le diesel, l'alcool, le gaz (GPL ou GNV) peuvent servir de carburant pour le moteur à quatre temps. Seul le moyen de déclenchement de la combustion diffère en fonction du carburant utilisé.

**CONSTITUTION** Les moteurs à combustion interne transforment l'énergie potentielle chimique stockée dans le carburant en énergie mécanique. Dans un cylindre, un piston

coulisse dans un mouvement de translation alternatif. Ce mouvement est transmis à une bielle reliant le piston au vilebrequin qui le transforme en mouvement de rotation. Le cylindre est fermé par une culasse munie d'au moins deux soupapes. L'une sert à amener le mélange air carburant et l'autre sert à évacuer les gaz engendrés par la combustion vers l'échappement. La figure 14 présente la constitution d'un moteur à quatre cylindres fonctionnant à l'essence.

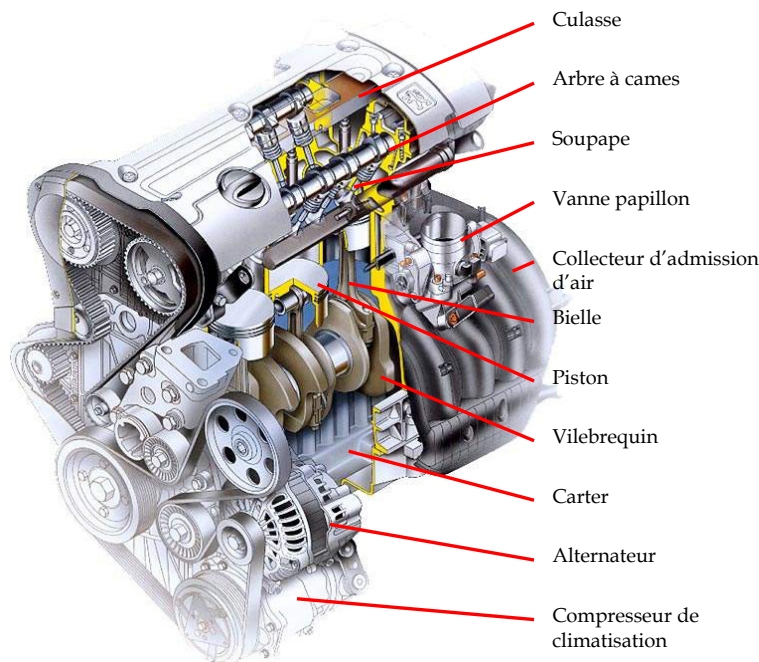


FIG. 14. Coupe d'un moteur 4 cylindres - source PSA

**FONCTIONNEMENT** Le fonctionnement de ce moteur se découpe en quatre phases ou temps d'où son nom, moteur à quatre temps. Le mouvement est initié par la combustion du mélange air carburant. La phase durant laquelle se déroule la combustion est la seule produisant de l'énergie. Les autres en consomment mais sont nécessaires pour rendre possible la combustion. La figure 15 illustre le principe du moteur à quatre temps.

- L'admission est la phase durant laquelle le mélange air carburant est amené dans le cylindre par l'intermédiaire de la soupape d'admission. Le mélange air carburant est préparé par un organe spécifique (carburateur ou système d'injection indirecte). Durant cette phase, le piston descend dans le cylindre ce qui permet l'aspiration du mélange.
- La compression est la phase durant laquelle la soupape d'admission se ferme et le mélange mis sous pression. Le mélange est soumis à une pression variant de 12 à 18 bars et à une température de 400 à 600 °C.

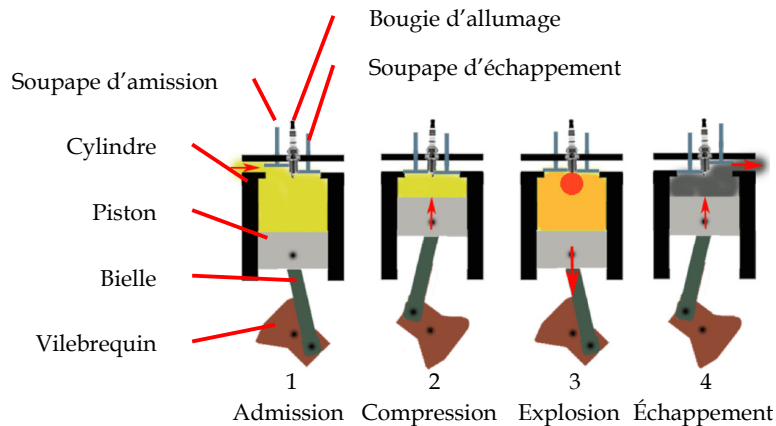


FIG. 15. Cycle à quatre temps

- La combustion est le moment où le mélange prend feu. Sous l'effet de la combustion, la détente des gaz génère un effort qui permet de repousser le piston. La pression dans le cylindre peut monter alors jusqu'à 40 bars. Le moyen d'allumage dépend du type de mélange (essence, gazole, gaz, etc.).
- L'échappement est la phase durant laquelle les gaz issus de la combustion sont évacués du cylindre par l'intermédiaire de l'autre soupape vers le collecteur d'échappement.

**ALLUMAGE DU MÉLANGE** Lors de la combustion, nous avons vu que le mélange avait besoin d'une source externe pour s'allumer. Concernant les moteurs à essence, une bougie est utilisée. Elle crée un arc électrique amenant l'énergie nécessaire à l'inflammation du mélange. Dans le cas des moteurs diesels modernes, seul de l'air (comprimé en général à l'aide d'un turbocompresseur) entre dans le cylindre lors de la phase d'admission. La compression lors de la remontée du piston permet d'augmenter considérablement la température de l'air. A l'approche de la compression maximale, le gasoil est injecté sous haute pression dans la chambre provoquant l'auto-inflammation du mélange et la détente des gaz. Le reste du cycle est identique au moteur à essence. Il subsiste néanmoins des bougies de préchauffage permettant le démarrage du moteur lorsque ce dernier est froid.

#### *Les carburants utilisés*

La majeure partie des carburants sont issus du pétrole. Les opérations de distillation et de raffinage effectuées dans les raffineries permettent d'obtenir différents hydrocarbures (figure 16).

- L'essence : l'essence est un hydrocarbure issu de la distillation du pétrole. Elle est



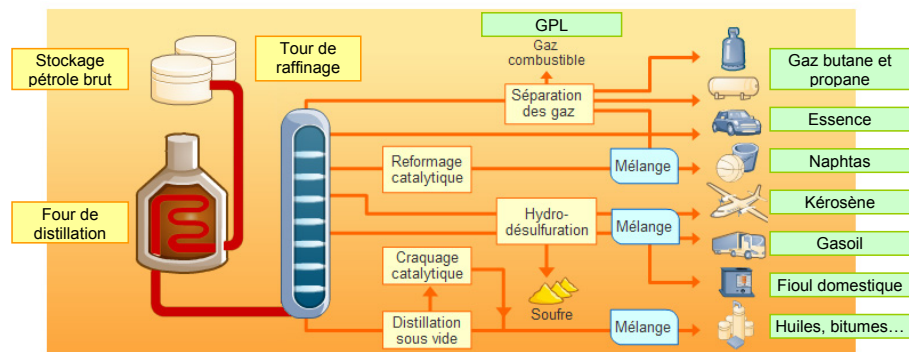


FIG. 16. Principe de transformation du pétrole en carburant

constituée d'alcane ( $C_nH_{2n+2}$ ), de cycloalcane, d'alcène et d'hydrocarbure aromatique de la famille du benzène.

- Le gazole : le gazole ou diesel est un fioul léger issu de la distillation du pétrole
- le GPL : le gaz de pétrole liquéfié est un mélange d'hydrocarbures légers stockés à leur état liquide et issu du raffinage du pétrole et du traitement du gaz naturel. Le GPL est principalement composé d'éthylène, de propylène, de butagène, de propane et de butane. Le GPL était considéré comme un déchet produit par la distillation du pétrole ; à l'époque on le brûlait au sommet de torchères.
- Les biocarburants : les biocarburants ou agro carburants sont des carburants produits à partir de matériaux organiques non fossiles. On distingue plusieurs productions : production d'huile, d'alcool de sucre, d'amidon hydrolysé ou des productions d'origines animales (méthane).

#### 1.2.4 Le véhicule électrique

En 1821, Michael Faraday met au point le principe du moteur électrique. Les deux principaux composants du véhicule électrique sont connus : batterie et moteur électrique. En 1831, le principe d'induction électromagnétique est découvert, ouvrant de nouvelles perspectives dans la conception des moteurs électriques et c'est en 1832 que le moteur électrique devient opérationnel. A l'époque actuelle, pourquoi l'on ne dispose pas de véhicule automobile à propulsion électrique ? Le véhicule électrique est une automobile dont le réservoir de carburant est remplacé par des batteries d'accumulateurs contenant l'énergie nécessaire au fonctionnement du moteur. Mais, malheureusement, l'énergie contenue dans un kilogramme de batterie est, dans le meilleur des cas, approximativement 500 fois plus petite que l'énergie contenue dans un kilogramme d'essence. Ceci démontre que l'utilisation de l'énergie électrique est, pour le moment, inexorablement limitée en attendant un progrès décisif dans le domaine des batteries.

### Historique

En 1800, Volta créa la première pile (cuivre zinc). Il ouvra ainsi la porte à l'utilisation de l'électricité à des applications mobiles. Le premier véhicule électrique, une calèche, fut construit par Davidson en 1873 : le moteur était alimenté par une batterie fer zinc. En 1881, G. Trouvé construisit la première voiture électrique qui fonctionnait à l'aide d'une batterie mise au point par Planté (acide plomb). Cette voiture avait une autonomie de 16 à 40 km et une vitesse maximale de 14 km/h.

En 1893 la première véritable voiture électrique est mise au point par les Français Jean-taud et Raffard Elle était équipée de batteries de 200 Ah d'une masse de 420 kg. La puissance du moteur était de 2,9 kW. La voiture prit part à la course Paris-Bordeaux-Paris en 1895. En 1897 la société Pope Manufacturing (USA) produisit plus de 2 000 taxis, ainsi que des autobus et des camions tous à motorisation électrique. Ils n'eurent cependant pas de succès durable. C'est l'époque où des courses longues distances apparaissent ce qui permet de tester la vitesse et la fiabilité des voitures. La «Jamais contente» (figure 17) est la première voiture à atteindre la vitesse de 100 km/h et c'est une voiture électrique. Il faut noter qu'en 1912, aux USA, un tiers des voitures étaient électriques. 10 000 véhicules automobiles électriques furent construits dont 6 000 de tourisme et 4 000 destinés au transport de marchandises. A cette époque les véhicules équipés de moteur à combustion interne commencent à prendre le pas sur les versions électriques : le Century Electric Roadster était vendu 1 750 dollars alors que la Ford T était vendue à 500 dollars [31]. En 1920, l'auto électrique perdit rapidement tout intérêt face au succès croissant du moteur à explosion (performance, autonomie, poids et rendement des batteries).



FIG. 17. La «Jamais contente» qui est la première voiture à passer les 100km/h - source Wikimedia Commons

C'est vers 1960 que l'intérêt pour les voitures électriques revient en raison de la pollution de l'air dans les grandes métropoles. Mais à cette époque les performances des véhicules électriques étaient largement inférieures à celles des véhicules à combustion interne. La vitesse maximum était de 65 km/h et l'autonomie variait entre 40 et 90 km. En 1960, General Motors lança un plan de 15 millions de dollars pour financer des recherches sur le véhicule électrique. Puis dans les décennies suivantes, les gouvernements retrou-

vèrent un intérêt croissant pour le véhicule électrique. Entre 1960 et 1990, les constructeurs automobiles produisèrent des véhicules électriques en petit nombre. Les problèmes majeurs restèrent le poids, l'autonomie et le coût. En 1990, l'état de Californie metta en place un programme appelé «zero-emission» et en 1998, 2% des véhicules vendus dans cet état étaient électriques. L'objectif était d'atteindre les 10% en 2003. En 1992, 300 Peugeot 106 et Citroën AX électriques furent progressivement confiées à des automobilistes rochelais (17). En 1998 : PSA et Renault proposèrent leurs dernières versions de véhicules électriques : Berlingo, Partner et Kangoo. Les marchés visés étaient le grand public mais surtout les flottes captives (EDF, La Poste, collectivités ...). De nos jours, quelques modèles marginaux sont encore commercialisés mais sans grande diffusion. Les grands constructeurs hésitent encore sur la solution à adopter : tout électrique ou hybride ? Néanmoins, au dernier salon mondial de l'automobile qui eu lieu à Paris en octobre 2008, plusieurs constructeurs ont exposés leur nouvelle génération de voiture tout électrique. Pas moins de 15 modèles avaient une réalité commerciale dans les deux à trois ans à venir. Il s'agissait de citadines, d'une autonomie annoncée d'environ 200 kilomètres pour un coût d'achat débutant à 21 000 euros.

### *Principe*

La propulsion se fait par un moteur électrique à courant continu ou alternatif. La source d'énergie embarquée est constituée d'une batterie d'accumulateurs (plomb, Ni-Cd, Ni-Mh, Li-ion, Zebra ...). La régulation de la puissance est réalisée par un dispositif électronique de contrôle. L'utilisateur doit bien sûr disposer d'un réseau de distribution d'électricité pour pouvoir recharger les batteries de son véhicule quand il en a besoin.

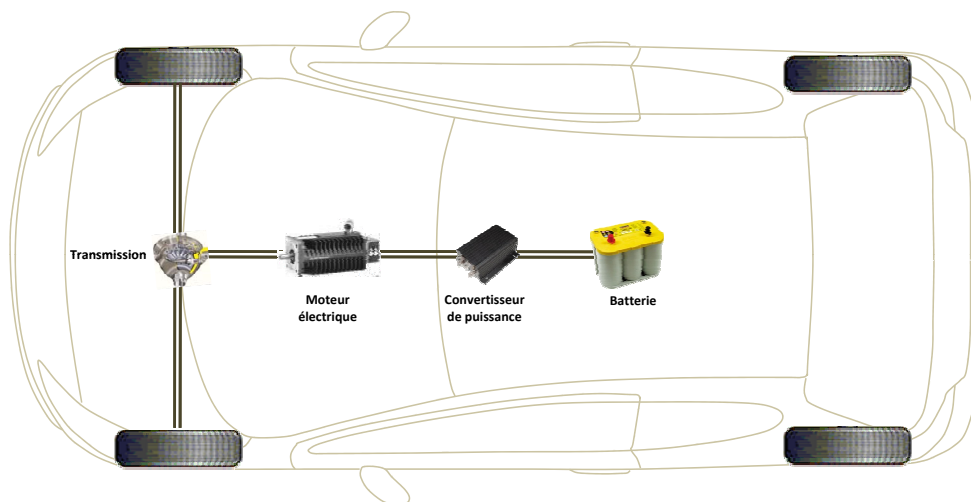


FIG. 18. Architecture d'un véhicule électrique

*Exemples*

Afin de fixer les idées, nous pouvons donner quelques exemples de véhicules électriques commercialisés.

**CITROËN BERLINGO** La figure 19 présente un écorché du véhicule. Ces caractéristiques générales sont les suivantes :

- moteur à courant continu et à excitation séparée ;
- puissance nominale de 15,5 kW et maximale de 28 kW ;
- couple maximal de 180 Nm ;
- pas de boîte de vitesses, pas d'embrayage, un seul rapport avant et une marche arrière ;
- vitesse maximale de 95 km/h, autonomie en roulage urbain de 95 km, accélération de 0 à 50 km/h en 8,4 s ;
- batterie de traction : 27 monoblocs cadmium-nickel de 6 V - 100 Ah refroidis par eau d'une durée de vie de 1600 cycles de charge et décharge (environ 100 000 km),
- temps de recharge : 9 h maxi.
- poids en ordre de marche : 1 450 kg (1 077 kg pour un Berlingo 1.1i essence), charge utile : 500 kg.

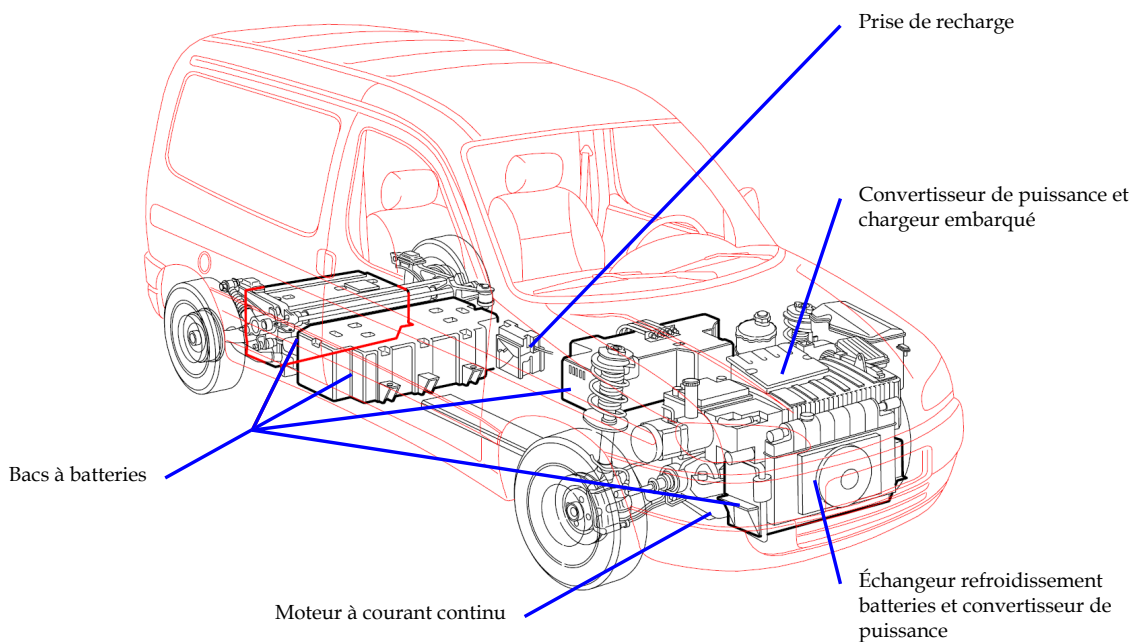


FIG. 19. Exemple du Berlingo électrique de Citroën

**MES-DEA TWINGO QUICKSHIFT (2005)**

- 36 kW, batteries Zebra ;

- 120 km/h, autonomie 130 km ;
- 25 000 euros ;
- commercialisée en Suisse et en Italie.

## VENTURI FETISH

- 180 kW, batteries Lithium-ion ;
- autonomie 250-350 km, 170 km/h, 0 à 100 km/h en 4,5 secondes ;
- 450 000 euros.

## BOLLORE BLUE CAR (PAS ENCORE COMMERCIALISÉE)

- 30 kW ;
- batterie Lithium-Métal-Polymère (5 fois plus légère que le plomb, entièrement recyclable, durée de vie de 10 ans, rechargeable en 6 heures) ;
- vitesse de pointe de 125 km/h ;

Avantages	Inconvénients
Confort d'utilisation : pas de boîte de vitesse ni embrayage	Autonomie : réservé à un usage urbain voire périurbain
Performances à basse vitesse	Coût : achat + location batteries
Coût «carburant» : environ 2 € pour 100 km	Chauffage (ou clim) peut efficace
Aucun rejet de polluants ni de gaz à effet de serre	Filière de production et recyclage des batteries à développer

TAB. 3. Avantages et inconvénients du véhicule tout électrique

1.2.5 *Le véhicule hybride*

Le véhicule hybride fait appel à plusieurs sources d'énergies distinctes pour se mouvoir. Par exemple un moteur thermique associé à un moteur électrique. Le principe général de fonctionnement du véhicule hybride est assez simple en soit. Il consiste à faire fonctionner soit le moteur électrique, soit le moteur thermique, soit les deux en même temps selon les modèles. Les caractéristiques générales sont les suivantes :

- Véhicule silencieux à l'arrêt ;
- Le moteur électrique assure la mise en mouvement de la voiture et/ou le démarrage du moteur thermique ;
- Lors des pics de puissance on utilise les deux moteurs ;
- Lors des phases de freinage, il est possible de récupérer l'énergie dans les batteries.

### Historique

Le concept de véhicule hybride est aussi ancien que le concept du véhicule proprement dit. Les premiers véhicules hybrides furent dévoilés au salon de Paris en 1899. Un premier modèle était propulsé par un moteur à combustion interne en parallèle avec un moteur électrique. Les batteries au plomb étaient rechargées par le moteur thermique lorsque le véhicule était à l'arrêt ou en roue libre. Le moteur électrique fonctionnait en support du moteur thermique. Un second véhicule hybride exposé fonctionnait avec un moteur à combustion interne en série avec un moteur électrique. Le moteur thermique était couplé à un alternateur et rechargeait les batteries. Le principal problème à l'époque vient du contrôle du moteur électrique. Il fallu attendre 1960 pour voir les premiers moteurs électriques contrôlés par des interrupteurs et des résistances.

Le premier modèle de véhicule hybride commercialisé (moteur à combustion interne et moteur électrique) fut la Toyota Prius. Honda a sorti également un modèle hybride (Civic hybride). Ces modèles permettent de diminuer la consommation de carburant et sont les premiers véhicules hybrides commercialisés qui répondent aux problématiques du déplacement individuel. Elles sont considérées par certains constructeurs automobiles comme éléments de base pour le prochain débat de l'avenir du marché automobile

### Les hybrides thermiques électriques

Nous allons distinguer trois familles d'hybrides. Ces trois familles se différencient par l'importance de la partie électrique dans le véhicule et de la façon dont elle est interconnectée avec le moteur thermique.

**LES MICRO HYBRIDES** Les architectures micro hybrides se distinguent par la présence d'un moteur d'environ 3 kW. Ce dernier joue le rôle d'alternateur et de démarreur ; il est appelé communément alerno-démarreur. La machine électrique permet de démarrer le moteur thermique et de recharger la batterie qui alimente les organes électriques du véhicule et fournit la puissance nécessaire au démarrage du moteur thermique. Ce système n'engendre pas de grands changements dans le bloc moteur et est assez économique. L'alerno-démarreur est relié à la courroie d'accessoire du moteur thermique comme l'illustre la figure 20.

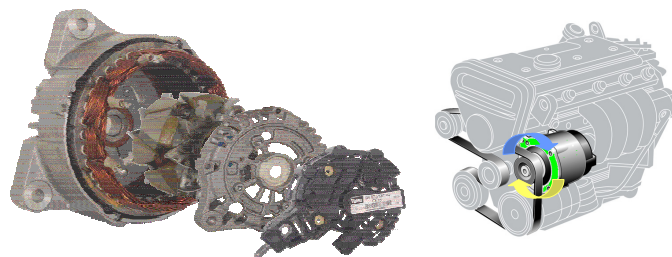


FIG. 20. Alerno-démarreur Valéo [27]

La machine électrique ainsi placée permet un fonctionnement de type "Stop and Start" c'est à dire que le moteur thermique est stoppé lors d'un arrêt bref. Cette fonction permet de réduire la consommation dans les cycles urbains (embouteillages, feux rouges, etc. ) et ainsi de réduire la pollution engendrée par les véhicules à l'arrêt. Le démarrage du moteur thermique peut être commandé par un relâchement de la pédale de frein par exemple. Cette architecture permet une réduction de la consommation d'environ 5 à 10 % selon le cycle routier (urbain, ou extra urbain).

**LE MILD HYBRID** Dans ce type d'architecture, l'alternateur-démarrreur est remplacé par un moteur électrique directement couplé au moteur thermique au niveau de la sortie du vilebrequin. Ce moteur a une puissance de 5 à 30 kW selon le type de véhicules (poids et fonctionnalité). Le moteur électrique est alimenté par une batterie dédiée et est commandé par un système comportant généralement un convertisseur de puissance réversible. Ce type d'assistance permet la fonctionnalité «Stop and Start» ainsi qu'une assistance à l'accélération. Lors des accélérations, le moteur électrique fournit de la puissance afin de lisser l'appel de puissance demandé au moteur thermique. La machine électrique est placée entre le volant moteur et l'embrayage. Avec cette structure (figure 21), il est possible d'utiliser des machines électriques de plus gros diamètre proposant donc de forts couples.

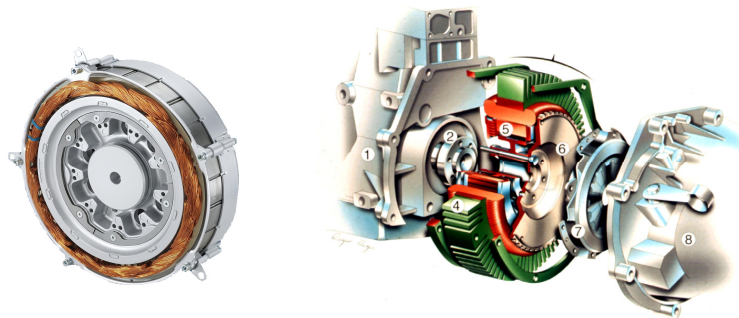


FIG. 21. Système mild hybrid Siemens

Si le système de conversion de puissance est réversible, le moteur électrique peut fonctionner en génératrice ; dans ce cas la puissance nécessaire sera fournie par le moteur thermique, mais cette architecture permet également la récupération d'énergie lors des phases de freinage. Ce mode est enclenché lorsque la pédale d'accélérateur est relâchée ou lorsque le frein est utilisé.

Cette architecture offre une possibilité de plus : la puissance du moteur électrique permet son utilisation conjointe avec le moteur thermique. La transmission permet d'utiliser les deux moteurs à des points de fonctionnement maximisant leur rendement. A basse vitesse, la traction peut être 100 % électrique sur quelques mètres. Cette architecture permet de réduire la consommation de 7 à 10 % selon le véhicule et le cycle routier.

**LES FULL HYBRIDS** Ce type de véhicule est équipé d'un moteur thermique et d'un moteur électrique pouvant atteindre une puissance cumulée de plus de 200 kW. Le moteur électrique est capable d'assurer seul la propulsion du véhicule. L'énergie électrique est fournie par des batteries rechargées par le moteur thermique lors de son usage, lors des freinages ou éventuellement à domicile ; on parle alors d'hybride "plug-in". Le choix du moteur utilisé pour propulser le véhicule est fonction du type de cycle et de l'énergie restant à disposition.

Les trajets urbains à faibles vitesse sont effectués à l'aide de la propulsion électrique alors que les autres phases de fonctionnement sont assumées par le moteur thermique. Le moteur électrique est utilisé en appoint lors des phases d'accélération par exemple. Le gain de consommation de telles combinaisons atteint 15 à 35 % selon le cycle. Nous allons présenter les trois architectures les plus usitées.

**Configuration hybride série** Dans ce type de configuration, le moteur thermique entraîne un alternateur qui alimente en énergie la batterie et le moteur électrique. Ce dernier entraîne le train roulant du véhicule. Des batteries sont en support du moteur thermique. La figure 22 schématise le principe de fonctionnement de la structure hybride.

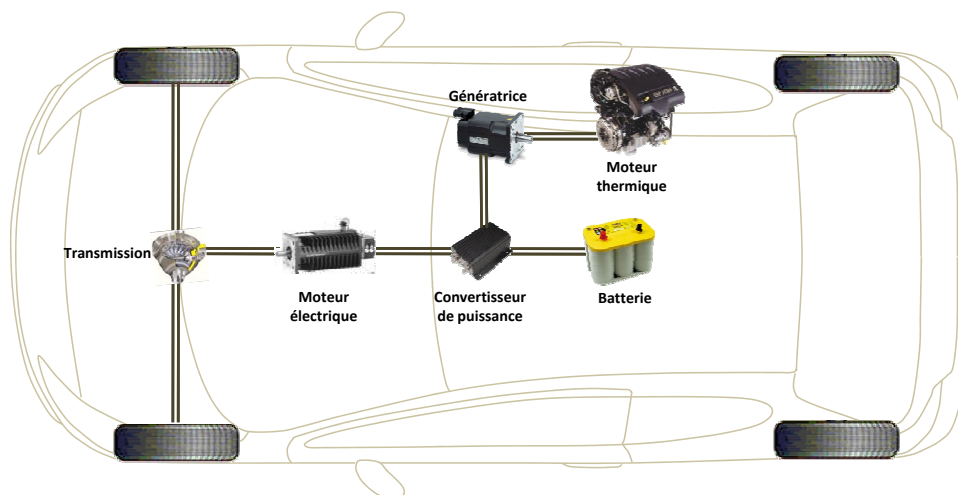


FIG. 22. Architecture hybride série

Ce type d'architecture permet une très grande souplesse dans son utilisation [9]. Le moteur électrique peut fonctionner uniquement sur la batterie. Le moteur thermique peut recharger la batterie et alimenter le moteur électrique. Par contre le rendement n'est pas très bon à cause de la double conversion d'énergie : thermique vers électrique puis électrique vers mécanique. Néanmoins Cette architecture permet d'obtenir des véhicules à faibles émissions particulièrement en cycles urbains. Les différentes phases de fonctionnement sont les suivantes (figure 23) :

- Au démarrage le moteur électrique assure la mise en mouvement du véhicule, jusqu'à des vitesses plus élevées (25 ou 30 km/h) ;



- Forte accélération : l'utilisation des deux moteurs à la fois permet d'obtenir des accélérations équivalentes à un moteur thermique de la même puissance cumulée, voire supérieures ;
- Vitesse constante : le moteur thermique alimente le moteur électrique et recharge la batterie ;
- Décélération et freinage : l'énergie cinétique est récupérée pour recharger les batteries.

**Configuration hybride parallèle** L'intérêt de la structure hybride parallèle est d'additionner mécaniquement les mouvements des moteurs thermique et électrique. Il est possible de fonctionner en tout électrique à vitesse lente. Le rendement en vitesse stabilisée est identique à celui d'un véhicule conventionnel sauf si on recharge la batterie en roulant. L'architecture des véhicules hybrides parallèles est présentée en figure 24. Le moteur thermique est connecté au moteur électrique via un embrayage. Certaines architectures plus simples se passent d'embrayage ou d'autres plus compliquées ajoute en plus une transmission variable. Le moteur électrique est alimenté par une batterie. La boîte de vitesse est capable de transmettre la puissance mécanique du moteur électrique alors que le moteur thermique est déconnecté à l'aide de l'embrayage.

Les possibilités d'utilisation de cette architecture sont plus nombreuses que l'architecture série. Il n'y a qu'une seule conversion d'énergie puisque le moteur thermique n'est pas couplé à un alternateur mais sur le même arbre que la transmission. En mode urbain, le moteur électrique peut propulser seul le véhicule si l'état de charge de la batterie le permet. L'utilisation du moteur électrique sera privilégiée dans les cas où le moteur thermique possède un mauvais rendement. Par contre, le moteur thermique sera favorisé lors des phases à vitesse constante. Les différentes phases de fonctionnement sont les suivantes (figure 25) :

- Au démarrage le moteur électrique assure la mise en mouvement du véhicule, jusqu'à des vitesses plus élevées (25 ou 30 km/h) ;
- Forte accélération : les deux moteurs sont utilisés afin d'obtenir la meilleure dynamique possible ;
- Vitesse constante : le moteur thermique fonctionne seul et recharge la batterie grâce à la machine électrique utilisée en générateur ;
- Décélération et freinage : l'énergie cinétique est récupérée par la machine électrique pour recharger les batteries.

Une autre solution intéressante est en cours de développement ; elle est d'ailleurs actuellement testée par PSA. Au lieu de regrouper le moteur électrique et le moteur thermique sur le même train, il est possible de déporter la partie électrique sur l'essieu arrière tout en conservant sous le capot moteur une configuration thermique classique (figure 26). La connexion mécanique entre les moteurs se fait donc par la route et non plus par une transmission mécanique directe.

Cette solution est envisageable aujourd'hui grâce aux progrès réalisés dans les machines électriques synchrones à aimants permanents. Par exemple, sur le prototype présenté en figure 27, la traction électrique est assurée par deux moteurs montés aux extrémités des essieux remplissant ainsi le volume disponible dans les jantes des roues : on utilise alors le terme de moteur-roue.

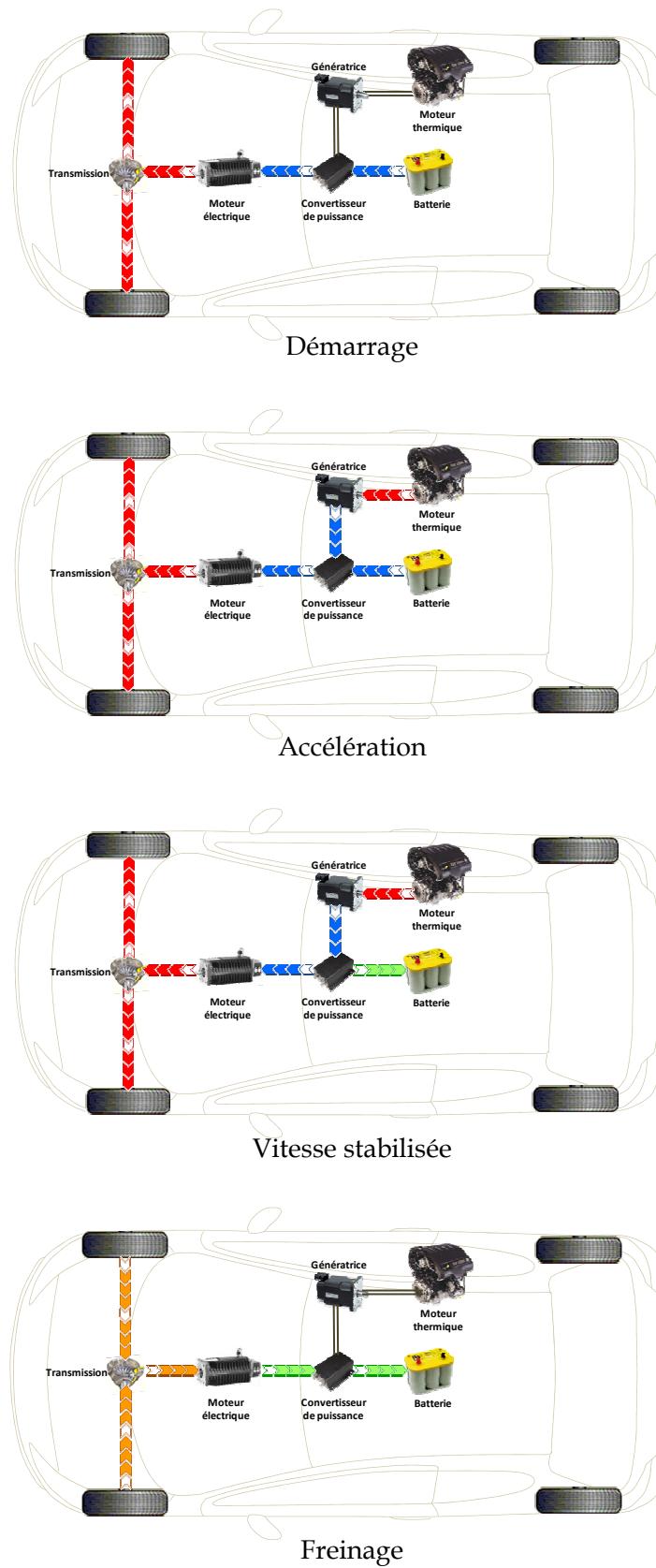


FIG. 23. Les différentes phases de fonctionnement de l'architecture hybride série

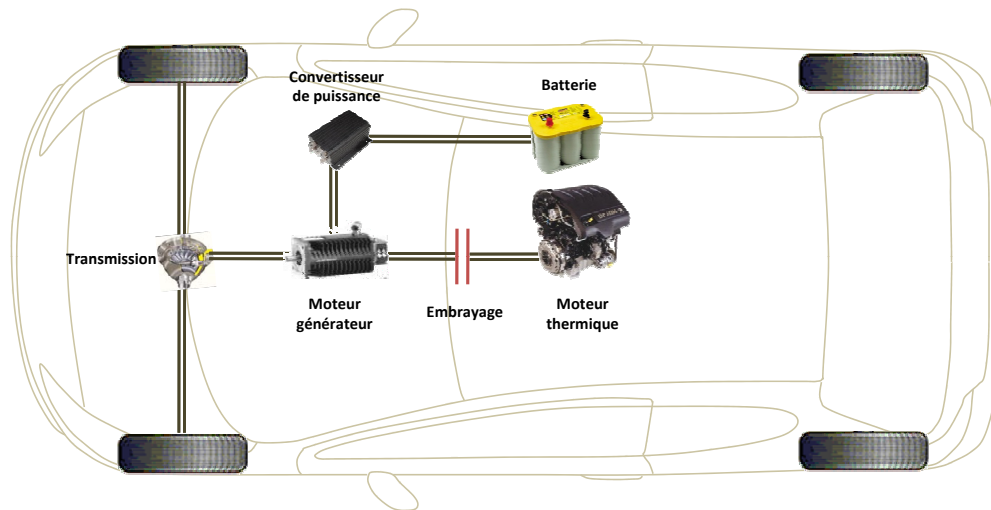


FIG. 24. Architecture hybride parallèle

Ce véhicule a les caractéristiques suivantes :

- un moteur thermique diesel : V6 HDi FAP, couplé à une boîte de vitesses automatique à 6 rapports, qui entraîne les roues avant et dont la puissance est de 150 kW ;
- deux moteurs-roues électriques à attaque directe implantés dans les roues arrière développant un couple unitaire de 400 Nm et une puissance unitaire de 15 kW ;
- 0 à 100 km/h en 6,2 secondes et 80 à 120 km/h en 4,2 secondes.

**Les hybrides parallèles à dérivation de puissance** L'architecture hybride parallèle à dérivation de puissance ou série-parallèle permet un fonctionnement en hybride série, hybride parallèle et tous les fonctionnements hybrides intermédiaires.

Le système de propulsion est composé d'un moteur à combustion interne, d'un ou plusieurs moteurs électriques et d'un répartiteur de puissance (figure 28). Le répartiteur de puissance est un train épicycloïdal qui permet d'entraîner les roues avec le moteur à combustion interne tout en fournissant de la puissance à une génératrice qui produira de l'électricité pour recharger les batteries et alimenter le moteur électrique. La recharge des batteries est également possible via le moteur d'entraînement lors des phases de freinage. Ce système permet de profiter des plages de rendement optimum des deux moyens de propulsions : à basse vitesse, c'est le moteur électrique qui sera le plus performant alors qu'à haute vitesse, le moteur thermique sera à son tour dans une plage de fonctionnement plus optimale. Toyota est le seul constructeur à utiliser cette structure avec sa marque haut de gamme Lexus. Cette architecture complexe, difficile à mettre au point a demandé de nombreuses années d'étude et un investissement financier considérable. Les différentes phases de fonctionnement (figure 29) sont les suivantes :

- Dans les phases de démarrage et aux faibles vitesses (jusqu'à 25 - 30 km/h) c'est le moteur électrique qui assure seul la propulsion du véhicule ;
- Lorsque la vitesse devient plus élevée et stable, le moteur thermique est seul en ac-

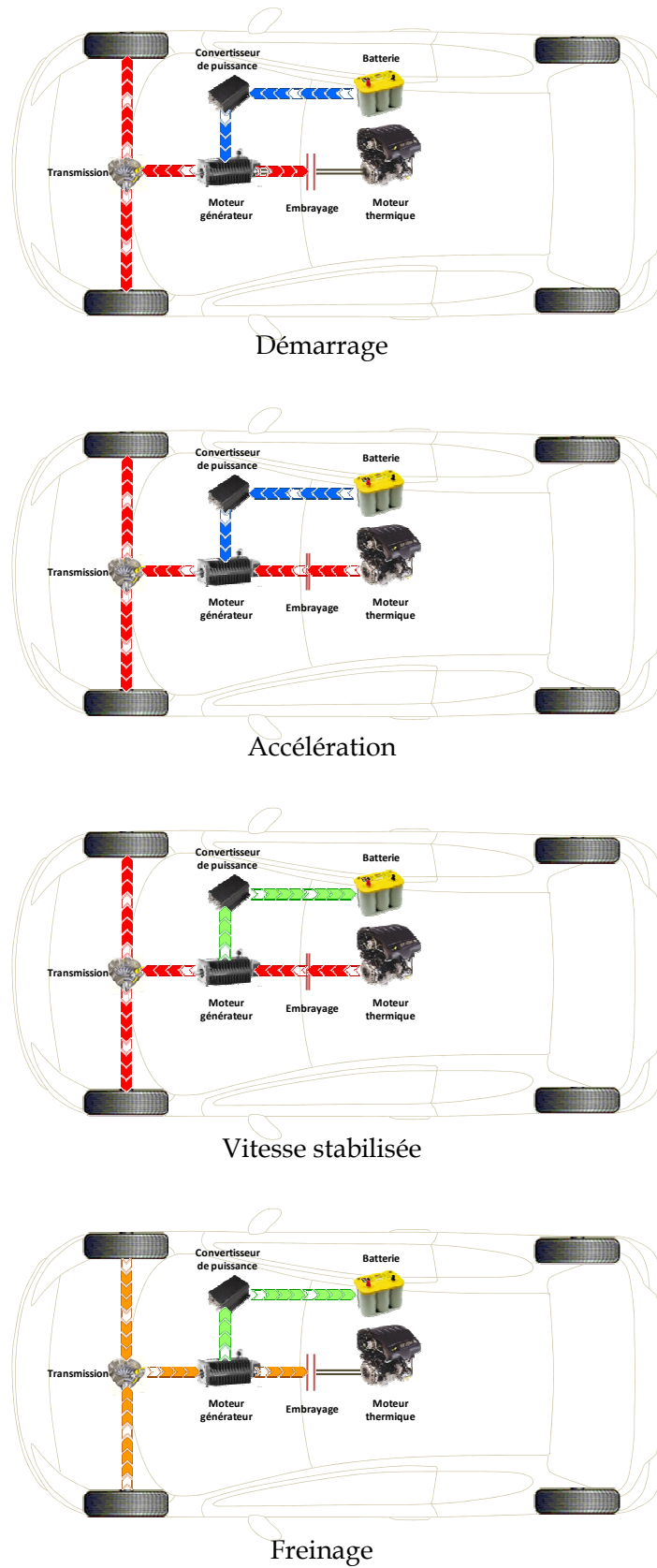


FIG. 25. Les différentes phases de fonctionnement de l'architecture hybride parallèle

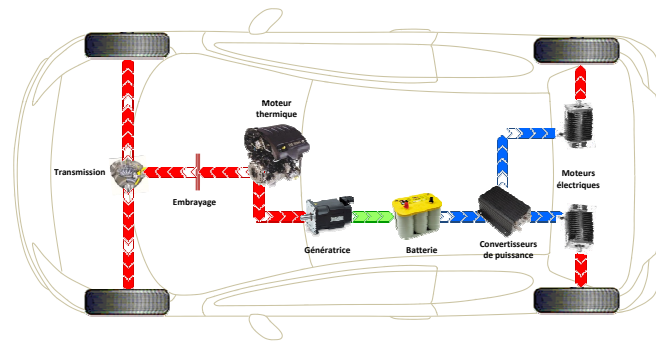


FIG. 26. Architecture hybride parallèle avec moteurs électriques sur l'essieu arrière

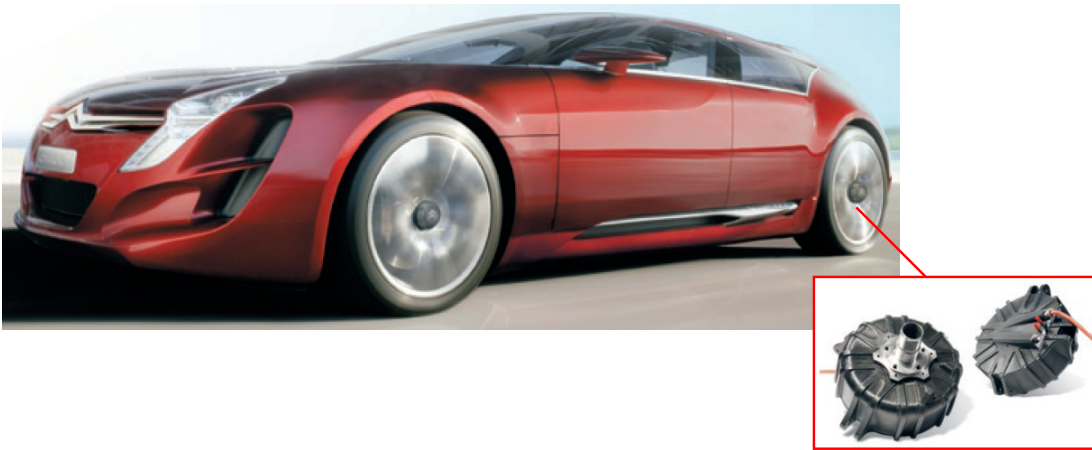


FIG. 27. Véhicule C-Métisse de Citroën à moteurs-roues électriques [29]

tion et assure la propulsion tout en rechargeant la batterie grâce à la génératrice entraînée par le train planétaire ;

- Lors des accélérations, le moteur électrique est en support du moteur thermique ;
- Lors des phases de décélérations et de freinage, la génératrice recharge la batterie.

Le point clé de cette architecture est l'intégration du train planétaire au milieu la chaîne de propulsion. La figure 30 détaille le principe de la transmission.

**SYNTHÈSE DES ARCHITECTURES HYBRIDES** Quelque soit l'architecture retenue, le gain de consommation de carburant sera fonction principalement du cycle routier. En utilisation urbaine, les véhicules hybrides permettent une nette réduction de consommation (jusqu'à 35 %) mais en cycle extra urbain, le moteur thermique reste principalement utilisé et la consommation reste similaire à celle d'un véhicule traditionnel. Le moteur électrique ne pouvant qu'assister le moteur thermique dans les phases d'accélération.

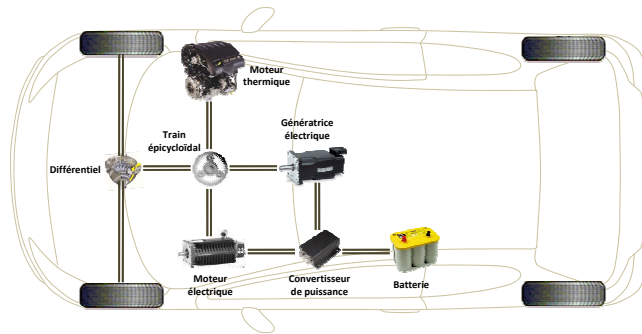


FIG. 28. Architecture hybride à dérivation de puissance

Type d'hybridation	Points positifs	Points négatifs
Série	<p>Bon rendement aux basses vitesses</p> <p>Bonne gestion du moteur thermique</p> <p>Gestion relativement facile</p>	<p>Faible rendement énergétique global</p> <p>Mode tout thermique impossible</p>
Parallèle	<p>Bon rendement énergétique</p> <p>Une seule machine électrique</p> <p>Liberté de choix du positionnement de l'embrayage</p>	<p>Moteur thermique plus sollicité</p> <p>Couplage mécanique plus complexe</p> <p>Gestion compliquée</p>
Mixte	<p>Très bon rendement énergétique</p> <p>Très bonne répartition de l'énergie</p> <p>Souplesse</p>	<p>Utilisation de plusieurs machines électriques</p> <p>Couplage mécanique complexe</p> <p>Gestion très complexe</p>

TAB. 4. Avantages et inconvénients des différentes architectures hybrides

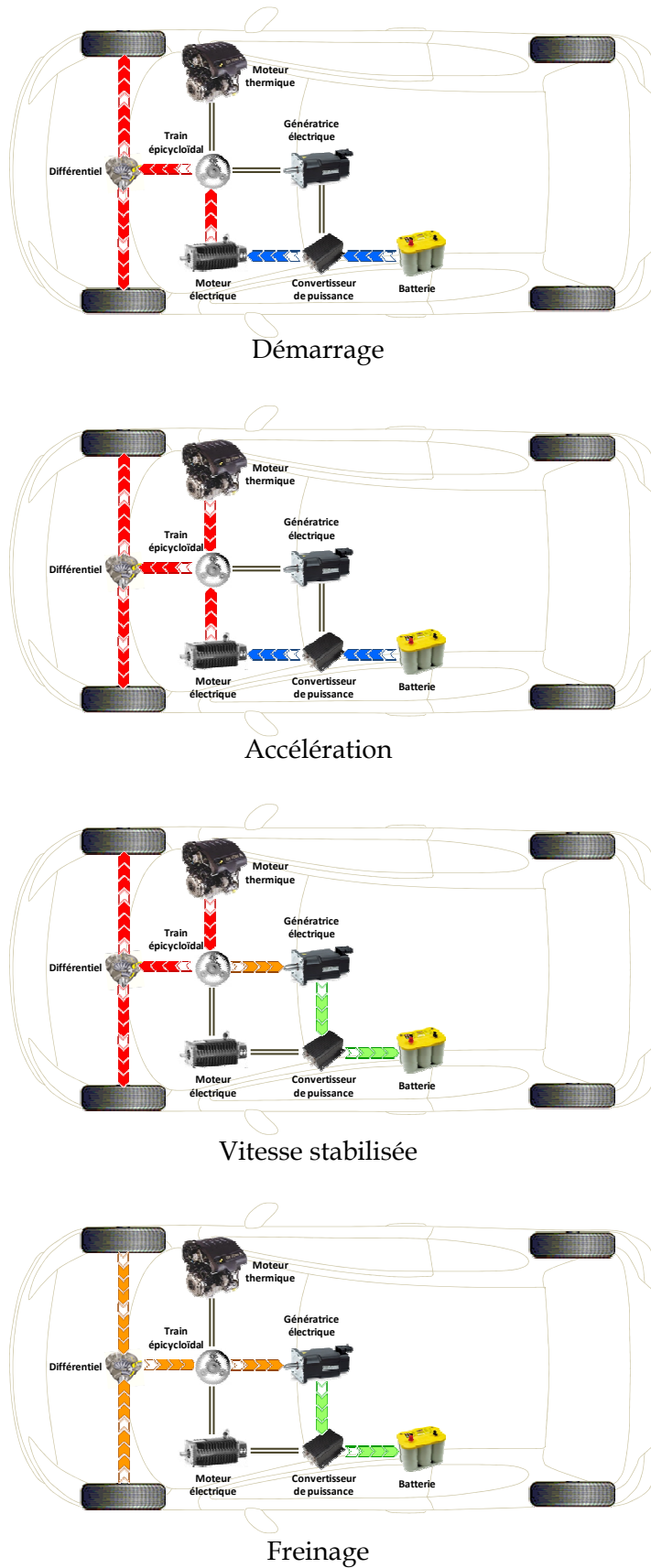


FIG. 29. Les différentes phases de fonctionnement de l'architecture hybride parallèle à dérivation de puissance

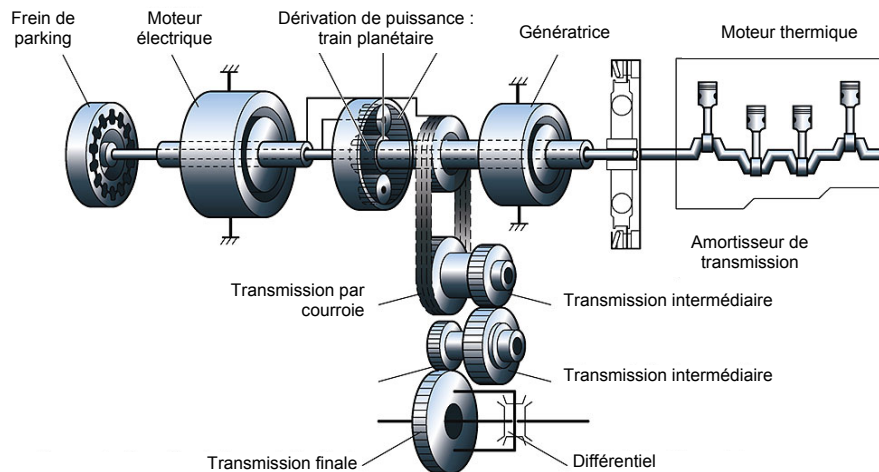


FIG. 30. Principe de fonctionnement de la transmission à dérivation de puissance

### Quelques exemples de véhicules hybrides

**VÉHICULES HYBRIDES PSA** Les véhicules présentés par PSA (308 et C4) sont basés sur une architecture hybride parallèle [11]. Les caractéristiques principales sont les suivantes :

- Moteur thermique
  - Type : Diesel 1,6 litre turbo
  - 66 kW à 4 000 tr/min - 215 Nm à 1 750 tr/min
  - Démarrage par Alternateur-démarrateur réversible (système Stop and Start)
- Moteur électrique
  - Type : Synchrone à aimants permanents
  - 16 kW en continu, couple de 80 Nm et 23 kW en puissance crête, couple maxi de 130 Nm
- Batterie
  - Type : Nickel-métal hydrure.
  - Tension nominale 288 volts.
  - Capacité 6,5 Ah : autonomie du véhicule en mode électrique 5 km

**TOYOTA PRIUS** La Toyota Prius utilise une architecture à dérivation de puissance [32]. Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- Moteur thermique
  - Type : essence 1,5 litre 16 s
  - 57 kW à 5 000 tr/min - Cmax : 115 Nm à 4 000 tr/min
- Moteur électrique
  - Type : Synchrone à aimants permanents
  - 50 kW - Cmax : 400 Nm de 0 à 1200 tr/min
- Batterie
  - Type : Nickel-métal hydrure.



- Tension nominale 200 volts.
- Capacité 6,5 Ah : autonomie du véhicule en mode électrique 5 km

### 1.2.6 Véhicule à pile à combustible : un hybride électrique

Un des objectifs à long terme des constructeurs automobile est de pouvoir se passer de pétrole pour faire fonctionner les véhicules. Actuellement la voie de la solution pile à combustible est ardemment explorée.

#### *La pile à combustible*

Une pile à combustible est un élément électrochimique qui produit de l'énergie électrique à l'aide d'une réaction chimique. La principale différence entre une batterie et une pile à combustible est que la pile à combustible fournit de l'énergie tant qu'elle est alimentée en combustible alors que la batterie transforme de l'énergie chimique stockée en énergie électrique et doit être rechargée pour fournir de l'énergie. Une pile à combustible, comme une batterie, possède deux électrodes, une positive et une négative.

Le principe de la pile à combustible à hydrogène est l'inverse de celui de l'électrolyse de l'eau. La réaction entre le combustible ( $H_2$ ) et l'oxydant ( $O_2$ ) produit de l'énergie. A l'anode, le dihydrogène est séparé en deux protons d'hydrogène et deux électrons :



Cette réaction nécessite un catalyseur. Le matériau retenu dépend de la température à laquelle s'effectue la réaction. Plus la température est élevée, meilleur sera le rendement de la réaction et le catalyseur pourra être alors de moins bonne qualité. Les électrons séparés du combustible permettent de créer un courant si une charge est présente entre l'anode et la cathode. Les protons d'hydrogène transitent à travers l'électrolyte jusqu'à la cathode. A la cathode, les protons d'hydrogène, les électrons et le dioxygène se combinent pour former de l'eau :



**LA PILE À COMBUSTIBLE PEMFC** Il existe plusieurs types de pile à combustible avec leurs forces et leurs faiblesses. Dans le cadre d'une application automobile, des températures de fonctionnement basses sont requises. Actuellement le type privilégié pour les applications automobiles est la pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC). Le schéma de principe de la PEMFC est présenté en figure 31.

Les PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cells) utilisent une membrane en polymère comme électrolyte. Cette membrane est acide. Le combustible de la PEMFC est de l'hydrogène pur et l'oxydant est de l'oxygène pur ou celui contenu dans l'air.

La membrane a pour rôle de laisser passer les ions  $H^+$  de l'anode vers la cathode tout en empêchant les électrons de passer. Les électrons passent par l'anode et rejoignent la cathode en passant à travers la charge électrique.

L'anode dispose d'un catalyseur contenant des particules de platine qui permet de séparer le dihydrogène en deux électrons et deux protons d'hydrogène. De même la cathode dispose aussi d'un catalyseur en platine.

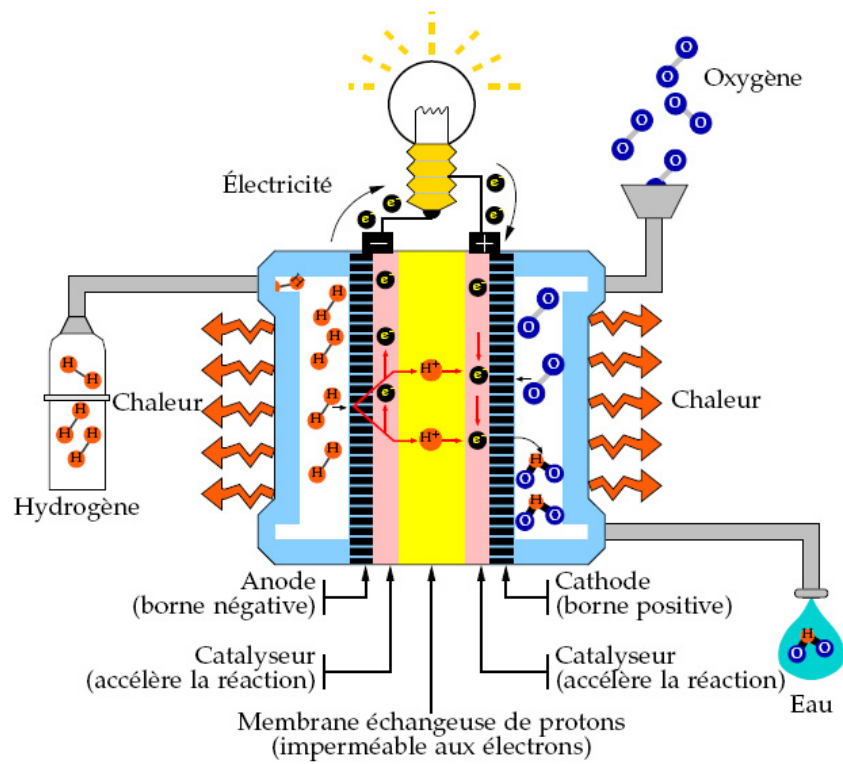


FIG. 31. Schéma de principe d'une pile à combustible [7]

Ce type de pile à combustible pose des problèmes de gestion de l'eau formée par la réaction. La membrane doit être humide pour fonctionner correctement. Si elle est trop sèche, elle ne conduit pas correctement les ions. Si elle est trop humide, la membrane bloque les ions. Ce type de pile à combustible est très sensible à la pollution. Le platine des catalyseurs est très sensible au monoxyde de carbone et aux sulfures. Une pollution du catalyseur entraîne une baisse de performance de la pile à combustible.

La plage de fonctionnement en température de la pile PEMFC se situe entre 40 et 100°C. Elle offre une densité de puissance comprise entre 0,35 et 0,6 W/cm<sup>2</sup>.

Cette pile à combustible est très intéressante pour une application automobile. Sa température de fonctionnement est compatible à une telle utilisation et la densité en puissance est très importante. Elle nécessite que peu de place pour fournir la puissance nécessaire au véhicule. Mais les matériaux utilisés par cette pile sont chers (platine et membrane en polymère) et le catalyseur est sensible à la pollution.

**SYSTÈME PILE À COMBUSTIBLE** La pile à combustible a besoin de nombreux auxiliaires pour fonctionner ; on parle alors de système pile à combustible (figure 32). Sans être exhaustif, on peut citer principalement :

- Le compresseur d'air : cet organe permet d'alimenter la pile à combustible en air. Un ordre de grandeur de débit est de 2 000 l/min sous une pression de 150 kPa pour alimenter en air une pile de 13 kW ;
- L'humidificateur : en humidifiant les gaz, on assure un fonctionnement optimal des membranes ;
- Le circuit de refroidissement : il permet d'évacuer les calories produites par la pile. Le caloporteur utilisé est en général de l'eau désionisée ;
- Le convertisseur de puissance : le niveau de tension de sortie de la pile dépendant du courant débité, il est nécessaire d'utiliser un convertisseur DC/DC pour alimenter le réseau électrique de puissance du véhicule.

**STOCKAGE DE L'HYDROGÈNE** Il existe trois façons de stocker l'hydrogène dans un véhicule. La première méthode consiste à stocker l'hydrogène à température ambiante à une grande pression. La deuxième consiste à stocker l'hydrogène à des températures très basses sous forme liquide ou solide. La dernière méthode consiste à stocker l'hydrogène dans du métal sous forme d'hydrure. Toutes ces méthodes présentent des avantages et des inconvénients. La solution privilégiée actuellement par les constructeurs automobile est d'utiliser un stockage gazeux haute pression (jusqu'à 700 bar) en utilisant des réservoirs en fibre de carbone.

#### *Hybridation de la pile à combustible*

Un des points faibles de la pile à combustible PEMFC est sa dynamique. En effet, les variations rapides de courant aux bornes des cellules provoquent de fortes variations d'humidité de la membrane. Il peut en résulter un assèchement ou un noyage de la membrane qui peuvent être néfastes. Dans le cas des automobiles, les constructeurs associent les piles à combustible avec un tampon de puissance matérialisé par une batterie d'accumulateurs et/ou de supercondensateurs.

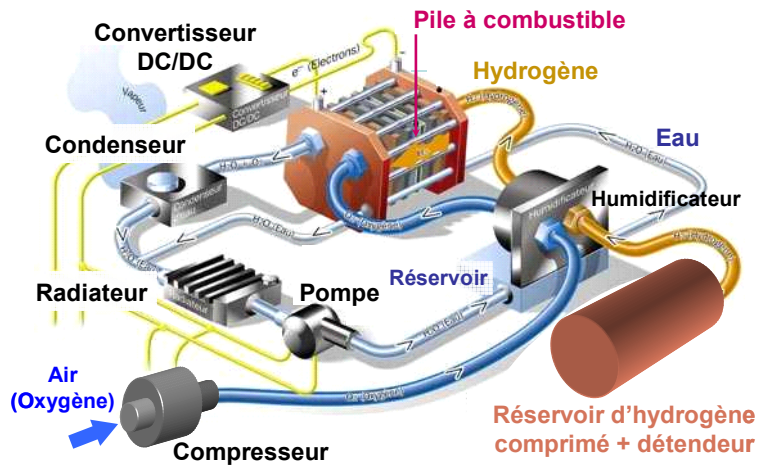


FIG. 32. Schéma de principe d'une pile à combustible - source PSA

**ASSOCIATION PILE À COMBUSTIBLE ET BATTERIES** Dans ce cas de figure on utilise des accumulateurs ayant une puissance spécifique importante comme tampon de puissance (figure 33). De plus si la batterie est destinée à jouer le rôle de prolongateur d'autonomie (range extender) on privilégiera des énergies spécifiques élevées. Les prototypes présentés par les constructeurs utilisent en générale la technologie Lithium car elle présente les meilleures performances malgré sa gestion délicate et son prix élevé.

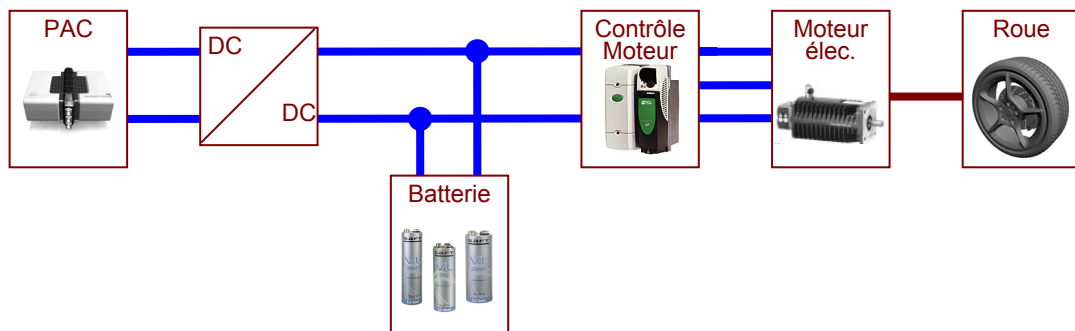


FIG. 33. Schéma de principe de l'association pile à combustible et batteries

A titre d'exemple, on peut citer le prototype 207 Epure de PSA (figure 34). Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- PaC technologie GENEPAC PEMFC de 20 kW ;

- 3 kg d'hydrogène comprimé à 700 bar ;
- batterie de type lithium-ion ;
- récupération d'énergie en phase de freinage ;
- autonomie de 300 km ;
- vitesse maximale de 130 km/h.

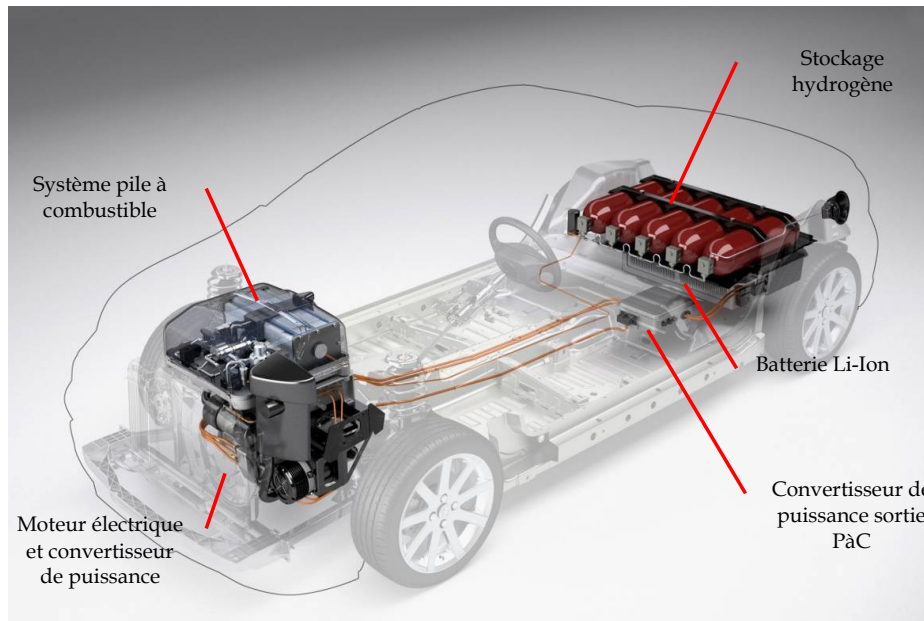


FIG. 34. 207 Epure : association pile à combustible et batterie Li-Ion - source PSA

**ASSOCIATION PILE À COMBUSTIBLE ET SUPERCONDENSATEURS** Il est possible d'utiliser des supercondensateurs comme tampon de puissance lors des phases transitoires. Ce sont d'ailleurs les composants idéaux pour ce type d'application (figure 35). Par contre, contrairement au cas précédent (hybridation avec batterie), l'autonomie du véhicule dépendra uniquement de la quantité d'hydrogène embarquée car les supercondensateurs ont une densité d'énergie très faible.

A titre d'exemple on peut donner les caractéristiques du prototype Bora Hy-power de Wolskvagen :

- Puissance moteur : 45 kW nominale et 75 kW en pointe ;
- Accélération : 0-100 km/h, 12 s ;
- Masse du véhicule : 1 922 kg ;
- Stockage hydrogène : réservoir de 52 litres à 350 bar ;
- Autonomie : 100 à 150 km ;
- Puissance de la pile à combustible : 48 kW ;
- Puissance des supercondensateurs : 50 kW.

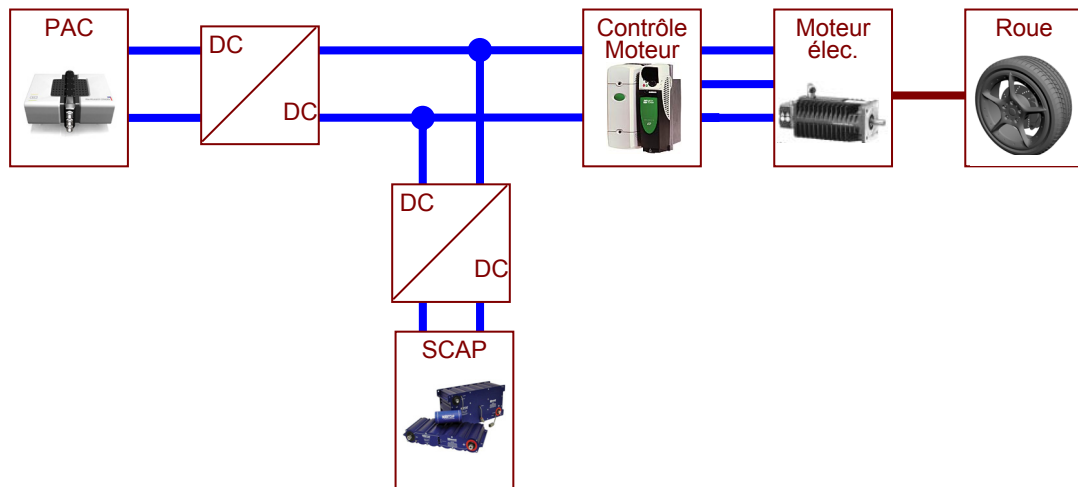


FIG. 35. Schéma de principe de l'association pile à combustible et supercondensateurs

### 1.3 STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

L'histoire du véhicule électrique est liée celle des batteries. La capacité des batteries a toujours été le facteur limitant au développement du véhicule électrique. Si à la fin du 19<sup>e</sup> siècle le véhicule électrique se porte bien, l'arrivée du moteur à combustion interne va mettre sur la touche la solution électrique.

La densité énergétique du gazole est supérieure à 2 000 Wh/kg quand celle d'une batterie au plomb comme celle utilisée par «La jamais contente» est de 35 Wh/kg. Cette différence peut à elle seule expliquer pourquoi le véhicule à moteur à combustion interne s'est imposé devant le véhicule électrique.

#### 1.3.1 Les batteries

Un accumulateur électrochimique ou batterie est un système permettant de convertir de l'énergie électrique en une énergie potentielle chimique durant la phase de charge et de convertir l'énergie potentielle chimique en énergie électrique lors de la décharge. C'est la modification chimique de l'électrolyte qui permet d'accumuler ou de restituer cette énergie. Une batterie est composée de plusieurs éléments (ou cellule unitaire) assemblés ensemble. Une cellule est composée de trois éléments :

- une électrode positive ;
- une électrode négative ;
- un électrolyte.

Les électrodes sont plongées dans l'électrolyte.

Les constructeurs de batteries spécifient la capacité des batteries (en ampères heures Ah) qui désigne le nombre d'ampères heures que peut fournir la batterie de la pleine

charge caractérisée par une tension (tension de circuit ouvert) à la tension de fin de décharge.

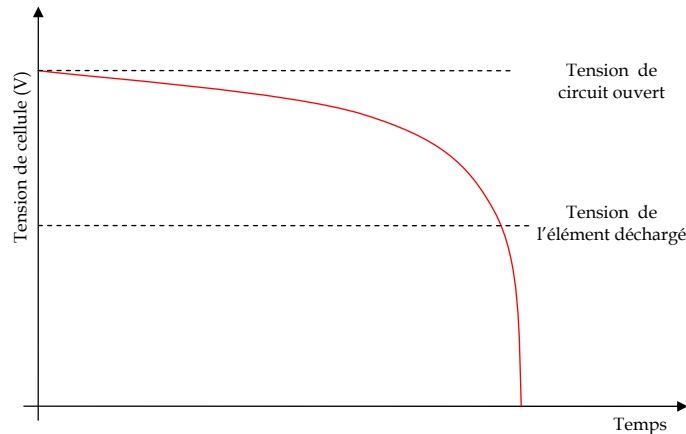


FIG. 36. Plage de fonctionnement en tension d'un élément électrochimique

Pour une même batterie, sa capacité varie en fonction du régime de décharge qu'on lui applique. En général, plus le régime de décharge est important, plus la capacité diminue (pour la décharge en cours). Généralement, les fabricants spécifient la capacité de la batterie en fonction du régime de décharge. Par exemple, une batterie peut être donnée pour une capacité  $C$  de 100 Ah à un régime de  $C_{10}$  (décharge complète de la batterie en 10 heures avec un courant de 10 A) et la même batterie aura une capacité  $C$  de 60 Ah à un régime de  $C_5$  (décharge complète de la batterie en 5 heures).

Un paramètre très important pour gérer correctement la batterie est son état de charge que l'on note SoC (State of Charge). L'état de charge est le ratio entre la capacité de la batterie chargée et la capacité actuelle de la batterie. Lorsque la batterie est totalement chargée son état de charge vaut 100 %, lorsqu'elle est déchargée son état de charge vaut 0 %. La capacité de la batterie étant fonction entre autre du courant de décharge, la mise en place d'un outil fiable d'indicateur d'état de charge est très difficile.

On remarque que plus le courant de décharge est important, plus la tension de la cellule est faible. La tension aux bornes de la cellule s'exprime par la relation suivante :

$$U = E_{em} - R_{int}I$$

La  $E_{em}$  est caractéristique du couple électrochimique employé et l'impédance interne ( $R_{int}$ ) de la cellule est principalement fonction de l'état de charge et du vieillissement de la cellule. Le tableau 5 présente les différentes tensions de FEM en fonction des matériaux utilisés.

#### *Les différentes batteries pour le véhicule électrique ou hybride*

**LES BATTERIES ACIDE PLOMB** La batterie acide plomb a été inventée en 1859 par Gaston Planté et fut utilisée dans le premier véhicule électrique en France en 1881. Les

Type de batterie	FEM (V)	Anode	Cathode	Electrolyte
Acide plomb	2,1	PbO <sub>2</sub>	Pb	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Nickel Cadmium	1,2	Ni	Cd	KOH
Nickel fer	1,2	Ni	Fe	KOH
Nickel Zinc	1,7	Ni	ZnO <sub>2</sub>	KOH
Nickel Métal Hydrure	1,23	Ni	Métal hydrure	KOH
Aluminium air	1,5	Al	O <sub>2</sub>	KOH
Zinc air	1,65	Zn	O <sub>2</sub>	KOH
Sodium sulfure	2,1	S	Na	$\beta$ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Sodium nickel	2,1-2,2	NiCl	Na	$\beta$ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Lithium sulfate de fer	1,75-2,1	FeS <sub>2</sub>	LiAl LiSi	ou LiCl/KCl
Lithium ion	3,6	Intercalation de carbone	LiCoO <sub>2</sub>	Organique

TAB. 5. FEM et matériaux constituant les principaux accumulateurs électrochimiques [21]



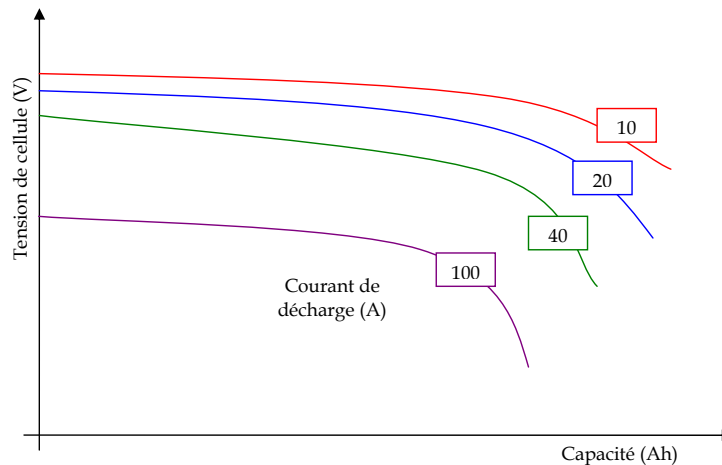


FIG. 37. Evolution de la tension en fonction de la capacité restante en fonction du régime de décharge

batteries au plomb sont encore aujourd'hui beaucoup utilisées dans le cadre d'applications autonomes. Les véhicules thermiques actuels utilisent une batterie au plomb pour démarrer. Ces batteries sont peu chères et la technologie est maîtrisée. Elles permettent de fournir des courants importants et leur durée de vie (nombre de cycles) est correcte. Ce sont des caractéristiques intéressantes pour une utilisation pour les véhicules électriques et les véhicules hybrides.

Mais la batterie au plomb ne présente pas que des avantages. La densité énergétique du couple plomb / acide est assez faible. Ces performances sont très dépendantes de la température. En dessous de  $10^{\circ}\text{C}$ , la puissance et la capacité sont alors fortement réduites. L'utilisation de batterie au plomb dans des pays froids nécessite un système de chauffage des batteries pour que ces dernières soient pleinement efficaces.

**LES BATTERIES AU NICKEL** Le nickel est un métal plus léger que le plomb et propose un potentiel électrochimique intéressant pour une application pour les batteries. Il y a quatre différents couples électrochimiques utilisés par des batteries nickel : nickel/fer, nickel/zinc, nickel/cadmium et nickel/métal hydrure.

**Nickel fer** Thomas Edison en 1901 a mis au point la première batterie nickel/fer. Ce type de batterie a été beaucoup utilisé (50 % du marché des voitures électriques) au début du 20<sup>e</sup> siècle. Cette batterie utilise une électrode positive en nickel et une électrode négative en fer. L'électrolyte est une solution d'hydroxyde de potassium.

Les batteries nickel/fer souffrent de dégazage lors de la fin de charge (électrolyse de l'eau en fin de charge du potentiel électrochimique) il est donc nécessaire de maintenir ce type de batterie en y rajoutant de l'eau pour maintenir la concentration de l'électrolyte constante. Le dégazage entraîne des problèmes de corrosion sur les électrodes. Ces batteries sont sujettes à l'auto décharge, en effet elles perdent un peu plus de 5% d'énergie

---

Energie spécifique	20-35 Wh/kg suivant l'usage
Densité d'énergie	54-95 Wh/l
Puissance spécifique	250 W/kg
FEM	2 V
Efficacité en charge et en décharge	80% suivant régime
Résistance interne	Très faible $\sim 0,022\Omega$
Température de fonctionnement	Ambiante, mauvais rendement à faibles températures
Auto décharge	$\approx 2\%$ par jour
Nombre de cycles	Plus de 800 à 80 % de la capacité
Temps de recharge	8h (mais 90 % en 1h est possible)

---

TAB. 6. Paramètres nominaux d'une cellule au plomb [21]

durant les 4 heures qui suivent la fin de charge.

Ces problèmes sont en passe d'être résolus sur des prototypes. Leur densité énergétique plus importante que les batteries plomb/acide, leur durée de vie supérieure (environ 2 000 cycles) et leur tolérance plus importante aux faibles températures en font une batterie plus intéressante pour une application véhicule électrique.

**Nickel cadmium** Les batteries nickel cadmium sont constituées d'une électrode positive en nickel, d'une électrode négative en cadmium. Les électrodes sont séparées par une matière poreuse qui absorbe l'électrolyte. Ce type de batterie supporte des courants forts ce qui est très intéressant dans une application véhicule électrique. Nissan a développé une batterie nickel/cadmium rechargeable en 15 minutes en travaillant sur le design de la batterie pour permettre de dissiper la chaleur engendrée par les forts courants. Ce type de recharge nécessite de mettre en place des lois de gestion de la batterie et de bien contrôler la température de celle-ci. PSA a été le principal utilisateur de batterie nickel/cadmium pour les véhicules électriques avec la Peugeot 106 électrique vendue à partir de 1995.

Le principal problème de cette technologie est la toxicité du cadmium et la difficulté à le recycler ce qui rend l'utilisation d'autres batteries plus intéressant.

**Nickel métal hydrure** Les batteries Ni-MH ont remplacé les batteries nickel cadmium dans de nombreuses applications ces dernières années. Elles offrent de meilleures performances sans les problèmes de toxicité du cadmium. Les batteries Ni-MH sont constituées d'une électrode positive en nickel et d'une électrode négative en hydrogène absorbé dans du métal. L'électrolyte est composé d'une solution d'hydroxyde de potassium. Ce type de

---

Energie spécifique	40-55 Wh/kg suivant le courant
Densité d'énergie	70-90 Wh/l suivant le courant
Puissance spécifique	125 W/kg
FEM	1,2 V
Efficacité en charge et en décharge	Bonne
Résistance interne	Très faible $\approx 0,06 \Omega$
Température de fonctionnement	-40 °C à 80 °C
Auto décharge	$\approx 0,5$ % par jour
Nombre de cycles	Plus de 1 200 à 80 % de la capacité
Temps de recharge	1h charge rapide possible : 60 % de la capacité en 20 minutes

---

TAB. 7. Paramètres nominaux d'une cellule nickel cadmium [21]

batterie est très sensible à l'intrusion d'air. L'hydrogène réagirait immédiatement. Elles sont pourvues d'une soupape de sécurité pour pouvoir dégazer lors de surcharges.

La tension à vide d'une cellule de nickel métal hydrure varie peu en fonction de son état de charge. Elle reste très proche de 1,2V.

Lors de la recharge, les batteries NiMH chauffent et particulièrement à des régimes élevés. Un système de refroidissement par air ou liquide permet de réduire la taille de l'emballage de la batterie et de diminuer le temps de charge en augmentant le régime de charge.

**LES BATTERIES AU SODIUM** Le sodium est un métal qui n'existe pas à l'état pur mais est très présent sous forme de composés. Il réagit très fortement avec l'eau et produit de la chaleur et du dihydrogène. L'utilisation du sodium dans les véhicules électriques ajoute un risque d'explosion et d'incendie dû aux températures des batteries et aux réactions du sodium avec l'eau lors des accidents de la route.

**Sulfate de sodium** La batterie au sulfate de sodium a été créée en 1960. Pour fonctionner la batterie doit être maintenue à une température de 300 à 350°C. Pour conserver cette chaleur, les cellules doivent être confinées. L'électrolyte est composé d'une céramique beta alumina qui joue un double rôle : permettre aux ions de circuler et cloisonner le sodium dans la cellule.

Pour être utilisée, la batterie doit être doucement chauffée jusqu'à sa température de fonctionnement. Une fois en fonctionnement, il n'est plus nécessaire de chauffer la batterie, les pertes joules dues au courant passant dans la batterie maintiennent la température au niveau nécessaire pour la réaction. Ce type de batterie possède une densité énergé-

---

Energie spécifique	65 Wh/kg
Densité d'énergie	150 Wh/l
Puissance spécifique	200 W/kg
FEM	1,2 V
Efficacité en charge et en décharge	Plutôt bonne
Résistance interne	Très faible $\sim 0,06\Omega$
Température de fonctionnement	Ambiante
Auto décharge	$\sim 5\%$ par jour
Nombre de cycles	Plus de 1 000 à 80% de la capacité
Temps de recharge	1h, charge rapide possible : 60% de la capacité en 20 minutes

---

TAB. 8. Paramètres nominaux d'une cellule nickel métal hydrure [21]

tique très importante (110 Wh/kg), une densité en puissance de 150 W/kg et possède une durée de vie d'environ 1000 cycles.

**Sodium chlorure de nickel** Les batteries sodium-nickel chlorure sont également appelées batteries Zebra (Zero Emission Battery Research Association) ou Beta batterie. Elles doivent être maintenues à une température comprise entre 300 et 350 °C. La batterie Zebra est très similaire à la batterie au sulfate de sodium, mais elle est plus sûre. L'électrode positive est solide (Chlorure de nickel), l'électrode négative est en sodium et l'électrolyte est à la fois solide et liquide.

Ce type de batterie a passé des tests de crash en Europe. Un certain nombre de véhicules de développement fonctionnent avec cette batterie.

Pour rester dans cette plage de température, la batterie Zebra utilise une partie de son énergie. De cette façon, on estime que l'énergie utilisée pour maintenir à température la batterie est de l'ordre de 10 % par jour, ce qui correspond à l'auto décharge d'autres technologies.

**LES BATTERIES AU LITHIUM** Le lithium est le métal solide le plus léger. Il possède un potentiel électrochimique très important (3,045 V). Les batteries au lithium ont été introduites sur le marché dès la fin des années 80. Elles offrent une intéressante densité d'énergie en comparaison des autres technologies de batteries. Aujourd'hui les batteries utilisant la technologie lithium sont couramment employées pour alimenter les objets multimédias nomades (ordinateur portable, téléphone portable, etc.).

---

Energie spécifique	100 Wh/kg (potentiellement 200 Wh/kg)
Densité d'énergie	150 Wh/l
Puissance spécifique	200 W/kg
FEM	2 V
Efficacité en charge et en décharge	Très bonne
Résistance interne	Similaire au NiCd
Température de fonctionnement	300-350 °C
Auto décharge	très faible, mais la batterie doit être maintenue à sa température et consomme de l'énergie
Nombre de cycles	Plus de 1000 à 80 % de la capacité
Temps de recharge	8h

---

TAB. 9. Paramètres nominaux d'une cellule sulfate de sodium [21]

---

Energie spécifique	100 Wh/kg
Densité d'énergie	150 Wh/l
Puissance spécifique	150 Wh/kg
FEM	2 V en moyenne
Efficacité en charge et en décharge	Très bonne
Résistance interne	Très faible et importante à faible état de charge
Température de fonctionnement	300-350 °C
Auto décharge	La batterie doit être maintenue à sa température entraînant une consommation d'énergie (10 % par jour)
Nombre de cycles	Plus de plus de 1 000
Temps de recharge	8 h

---

TAB. 10. Paramètres nominaux d'une cellule Zebra [21]

**Lithium polymère** Ce type de batterie fonctionne à des températures de 80°C à 120°C, il est possible de les faire fonctionner à température ambiante en diminuant la puissance qui leur est demandée. L'électrode négative est en lithium, l'électrolyte est un alliage de lithium et de fer. L'électrode négative en lithium solide est sujette à des problèmes de passivation diminuant les performances de la batterie. Aujourd'hui, les batteries lithium ion surpassent cette technologie.

**Lithium-ion** Ce type de batterie a une construction similaire à celle des batteries lithium polymère. Elles ont été introduites à la vente au début des années 90. Il est possible de recharger 80% de ces batteries en moins d'une heure.

L'électrode négative est composée de carbone et de lithium et l'électrode positive est un sel de lithium. Des recherches sont toujours en cours pour améliorer cette technologie. Des électrodes à base de manganèse sont à l'étude. Pour le moment les électrodes positives sont à base de cobalt.

Ce type de batterie est très sensible à sa tension de charge, lors de la charge et du fonctionnement de la batterie, il est nécessaire de bien rester attentif à la tension de batterie. Si la charge de la batterie n'est pas correctement gérée, la batterie peut prendre feu.

---

Energie spécifique	90 Wh/kg
Densité d'énergie	153 Wh/l
Puissance spécifique	300 W/kg
FEM	3,5 V
Efficacité en charge et en décharge	Très bonne
Résistance interne	Très faible
Température de fonctionnement	Ambiante
Auto décharge	Très faible (10 % par mois)
Nombre de cycles	Plus de 1000
Temps de recharge	2-3 h

---

TAB. 11. Paramètres d'une cellule lithium ion [21].

### *Bilan sur les batteries*

Le choix de la batterie va dépendre de son utilisation. Dans le cas d'un véhicule hybride, les batteries sont sollicitées lors des accélérations et des déplacements à très faible vitesse, elles ne seront pas sollicitées dans la durée. Les batteries à base de nickel sont encore très utilisées et le lithium commence à faire son apparition alors que le plomb est encore présent.

Le tableau 12 présente les différents couples électrochimiques utilisés par les batteries des véhicules électriques.

Type de batterie	Densité énergétique (Wh/kg)	Densité en puissance (W/kg)	Température de fonctionnement (°C)	Nombre maximal de cycles	Coût de production (US\$/kWh)
Acide plomb	35-50	40-150	Ambiante	500-1000	120-150
Nickel Cadmium	50-60	80-150	Ambiante	800	150-350
Nickel fer	50-60	80-150	Ambiante	1500-2000	200-400
Nickel zinc	55-75	170-260	Ambiante	300	100-300
Nickel métal hydrure	70-95	200-300	Ambiante	750-1200	200-350
Aluminium air	200-300	160	Ambiante	pas de données	pas de données
Fer air	80-120	90	Ambiante	500	50
Zinc air	100-220	30-80	Ambiante	600	50
Sodium sulfure	150-240	230	350	800	250-450
Sodium nickel	30-120	130-160	300	1200	230-345
Lithium sulfate de fer	100-130	150-250	150	1000	400
Lithium ion	80-130	200-300	Ambiante	1000	400

TAB. 12. Principales caractéristiques des batteries pour véhicule électrique [21]

Le plomb reste la technologie meilleur marché, mais les performances de ces batteries sont en retrait par rapport aux batteries au nickel. La solution batterie au plomb est en voie d'abandon pour la traction. Les batteries NiMH remplacent actuellement les batteries NiCd. Les batteries hautes températures offrent également de très bonnes performances mais le design des véhicules devra être changé pour permettre l'utilisation de telles batteries. Le futur verra certainement les batteries au lithium émerger car elles offrent des performances comparables aux batteries hautes températures mais à température ambiante.

La durée de vie de la batterie est un élément essentiel car le coût de remplacement de celle-ci est trop important aujourd'hui pour qu'un véhicule électrique puisse être commercialisé.

### 1.3.2 Les supercondensateurs

Les cycles routiers, surtout en ville, sont ponctués de nombreuses phases de démarrages et d'arrêts. Une puissance moyenne est disponible dans les moyens de stockage

que sont les batteries et les piles à combustible, mais les démarrages ou les accélérations brutales demandent des pics de puissance. En cycle urbain, les accélérations et les décélérations représentent environ deux tiers de l'énergie consommée par le véhicule. La source d'énergie doit être dimensionnée en énergie et puissance. La difficulté à obtenir une bonne énergie spécifique et une bonne densité en puissance tout en gardant une bonne durée de vie des éléments de stockage laisse penser qu'une hybridation des sources d'énergie est une solution à retenir pour les véhicules électriques. Les pics de puissance peuvent être lissés par des éléments ayant une puissance spécifique importante. Le rechargement pourra être fait durant les régimes de faible consommation ou lors des freinages par récupération d'énergie.

#### *Caractéristiques des supercondensateurs*

Un supercondensateur permet d'obtenir une densité de puissance et une densité d'énergie intermédiaires entre les batteries et les condensateurs électrolytiques classiques comme le montre le diagramme de Ragone présenté en figure 38.

Le supercondensateur possède une puissance instantanée très importante et une durée de vie très élevée d'environ 100 000 cycles. Il a une structure anode-cathode à base de charbon actif, permettant de disposer d'une surface active considérablement élevée par rapport aux condensateurs traditionnels, et permet ainsi d'obtenir des valeurs très élevées de capacités (supérieures à 3 600 F).

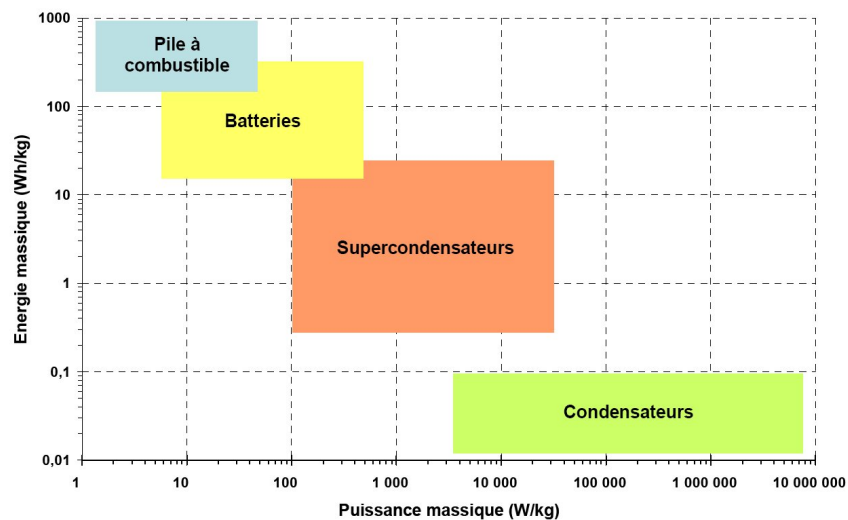


FIG. 38. Diagramme de Ragone comparant les caractéristiques des supercondensateurs à d'autres composants de stockage d'énergie

La puissance spécifique des supercondensateurs est supérieure à 3 kW/kg. Aucune batterie à ce jour n'atteint ces valeurs de puissance spécifique. Il est donc très intéressant d'utiliser ces composants comme source de puissance auxiliaire dans les véhicules électriques [14] et [12]. Les batteries assument la dépense énergétique et les supercondensateurs lissent les demandes en puissance (figure 39 (a)). De cette façon, la batterie



ne subira pas de transitoires de puissance et sa durée de vie s'en verra augmentée. Le rechargement des supercondensateurs pourra se faire lorsque la puissance nécessaire diminuera ce qui aura toujours pour effet de lisser la demande de puissance à la batterie et permettra de recharger les supercondensateurs (figure 39 (b)).

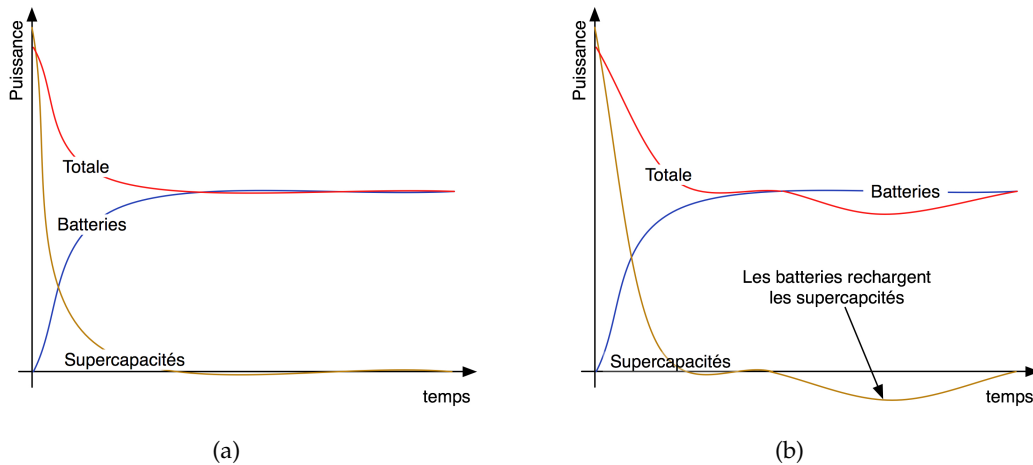


FIG. 39. Exemple de répartition de la puissance fournie par des batteries et des supercondensateurs

Le tableau 13 donne les caractéristiques techniques des supercondensateurs produits par la société Maxwell. On note un rapport mille entre la puissance spécifique et l'énergie spécifique des supercondensateurs.

#### Principe de base

Le principe des supercondensateurs est identique à celui des condensateurs électrochimiques, et repose sur le concept de la double couche. Un électrolyte (conducteur purement ionique, isolant électronique) est placé entre deux électrodes conductrices électroniques à très haute surface spécifique (plusieurs centaines ou milliers de  $\text{m}^2$  par gramme de matière). Le déplacement des ions positifs ou négatifs dans l'électrolyte sous l'effet d'un champ électrique appliqué entre les électrodes leur permet de former à la frontière de chacune une accumulation de charges électriques qu'on appelle une double couche. Théoriquement, les ions restent confinés dans l'électrolyte et il n'intervient pas de réaction électrochimique à l'interface avec les électrodes, contrairement à ce qui se passe dans un accumulateur. Il en résulte une longévité et une cyclabilité beaucoup plus élevées. Cependant, les déplacements d'ions dans l'électrolyte étant plus lents, la constante de temps de déplacement de l'équilibre dans un sens ou dans l'autre est bien supérieure à celle d'un condensateur. Enfin, la tenue diélectrique de la double couche étant faible (de l'ordre de quelques volts), un grand nombre de cellules élémentaires doit être mis en série pour aboutir à une tension élevée. La figure 40 présente la structure interne d'un supercondensateur.

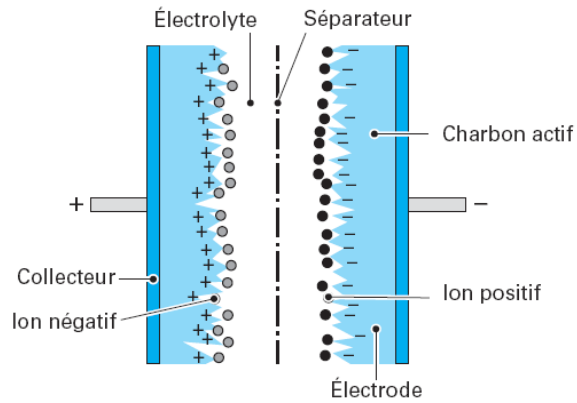


FIG. 40. Structure interne d'un supercondensateur [17]

L'énergie totale stockée dans la supercapacité s'exprime :

$$E_{capa} = \frac{1}{2}CV^2 \quad (1.3)$$

Où  $C$  est la capacité en Faraday et  $V$  est la tension aux bornes de la supercapacité. Plus la tension aux bornes de la supercapacité est élevée plus l'énergie pouvant être restituée est importante. Avec un électrolyte aqueux, la tension est d'environ 0,9V alors que les électrolytes non aqueux permettent de monter à des tensions de 2,3 à 3,3 V.

	BCAP0010 (Cellule)	BMOD0115 (Module)	BMOD0117 (Module)
Capacité (F, -20%/+20%)	2600	145	435
Résistance série maximum à 25°C ( $m\Omega$ )	0,7	10	4
Tension (V), continue (pic)	2,5 (2,8)	42(50)	14(17)
Puissance spécifique ( $W/kg$ )	4300	2900	1900
Energie spécifique ( $Wh/kg$ )	4,3	2,22	1,82
Courant maximum (A)	600	600	600
Dimension (mm)	60 x 172 (cylindre)	195 x165 x 415 (boite)	195 x 265 x 145 (boite)
Poids (kg)	0,525	16	6,5
Volume (l)	0,42	22	7,5
Température de fonctionnement (°C)	-35 à 65	-35 à 65	-35 à 65
Température de stockage	-35 à 65	-35 à 65	-35 à 65
Courant de fuite (mA), 12h, 25°C	5	10	10

TAB. 13. Spécifications techniques de supercapacité en cellule et en modules intégrés de la technologie Maxwell

#### 1.4 CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce premier chapitre la constitution générale d'un véhicule automobile classique. Le principe du moteur à combustion interne à quatre temps a été montré. Nous avons vu l'influence des rejets polluants des moteurs thermiques dans l'environnement et les moyens mis en œuvre par les constructeurs automobile pour tenter de les limiter.

Différentes solutions alternatives commercialisées ou en passe de l'être ont été présentées : le véhicule tout électrique ainsi que les différentes architectures hybrides ont été détaillées et comparées.

Un récapitulatif des moyens de stockage de l'énergie électrique a montré que de gros progrès dans les accumulateurs électrochimiques doivent être réalisés pour que les solutions tout électrique s'imposent.

Enfin nous avons introduit la technologie de la pile à combustible pour l'automobile en mettant l'accent sur l'hybridation de cette technologie avec des éléments tampons de puissance tels que les supercondensateurs.

## PRÉSENTATION ET DIMENSIONNEMENT DES SYSTÈMES ÉTUDIÉS

---

### 2.1 INTRODUCTION

La mise en place d'une plate-forme de prototypage virtuelle nécessite la constitution d'une bibliothèque de modèles numériques de composants et de systèmes. Pour les valider, des tests expérimentaux de composants réels sont nécessaires.

D'autre part, nous souhaitons, en plus des modèles, valider des lois de gestion d'énergie de différentes chaînes de traction hybrides. Pour réaliser ces objectifs, nous avons conçu et réalisé deux systèmes complets permettant la caractérisation et la validation de nos modèles.

Le premier équipement présenté est un fauteuil roulant intelligent alimenté par une pile à combustible hybridée avec une batterie. Le second est un banc d'essai d'architectures hybrides multi sources destiné à valider des méthodes de contrôle de chaînes de traction destinées au transport terrestre.

### 2.2 FAUTEUIL ROULANT ÉLECTRIQUE HYBRIDE PILE À COMBUSTIBLE ET BATTERIE

#### 2.2.1 *Description du système*

Le système étudié est un fauteuil roulant électrique (figure 41) possédant une structure hybride électrique ainsi que des fonctions embarquées avancées améliorant l'autonomie des personnes handicapées [8]. La source principale du système est une pile à combustible d'une puissance maximale de 300 watts. Elle est connectée à une batterie au plomb par l'intermédiaire d'un hacheur abaisseur. Bien entendu la technologie plomb n'est pas celle qui est la plus efficace pour les véhicules électriques dû au fait de sa faible densité d'énergie. Néanmoins, elle permet de fournir des pointes de puissances importantes à un prix bon marché. Nous testeront prochainement dans cette application une batterie Nickel Métal hydrure ainsi qu'une batterie Lithium Polymère.

Les piles à combustibles sont des sources non réversibles en courant et ont des temps de réponses relativement élevés. Ces caractéristiques font qu'il est préférable dans les applications traction électrique d'associer aux piles à combustible une source d'énergie ou de puissance réversible (batterie ou supercondensateur) qui permet de fournir ou d'absorber les pointes de puissances durant les phases transitoires (accélérations, freinages récupératifs). La pile à combustible choisie a été dimensionnée pour fournir la puissance moyenne consommée par le système sur un cycle typique.

Nous avons choisi de proposer dans un premier temps un système simple mais robuste afin de montrer la pertinence d'utiliser une pile à combustible pour l'application fauteuil roulant électrique. Des travaux en cours visent à améliorer les performances du hacheur



FIG. 41. Fauteuil roulant prototype

en utilisant une structure originale permettant d'améliorer le rendement du convertisseur. On pourrait envisager d'utiliser une structure quasi-résonnante comme celle présentée par Wang *et al.* [30].

#### *Architecture*

La pile à combustible utilisée est de type PEFC (Polymer Electrolyte Fuel Cell). Sa puissance maximale est de 300 watts et sa tension varie entre 30 et 58 volts (figure 42). Elle travaille à basse température et à pression atmosphérique coté cathode. Sa particularité principale est que le contrôle du débit d'air ainsi que le refroidissement de la pile sont assurés par le même actionneur représenté par trois ventilateurs à courant continu.



FIG. 42. Pile à combustible PEFC 300 W

Le convertisseur DC/DC permet de contrôler le courant débité par la pile sachant que

la tension du bus continu est imposée à environ 24 volts par la batterie.

Les convertisseurs de puissance pilotant les deux moteurs de traction sont des hacheurs quatre quadrants ; ils permettent de commander les moteurs dans les deux sens de rotation et d'assurer aussi les phases de freinage récupératif.

Le contrôle de toute la partie énergie du système est réalisé à partir d'un système micro-autobox dSPACE embarqué dans le fauteuil fonctionnant en temps réel. Il assure l'acquisition et le traitement des données ainsi que le contrôle des convertisseurs de puissance. L'atout majeur de ce système est de pouvoir développer très rapidement des stratégies de contrôle en s'affranchissant de toute programmation « manuelle » de micro-processeur. En effet, le traitement des données et les lois de contrôle sont développés à l'aide de Matlab-Simulink, puis sont compilés et directement implémentés dans le processeur temps réel de la micro-autobox. C'est ce que l'on appelle le prototypage rapide.

Les autres fonctionnalités implantées dans le fauteuil concernent l'amélioration la mobilité et la sécurité de l'utilisateur. On peut citer par exemple un système GPS, un pilotage à distance à l'aide d'un agenda électronique (PDA), une transmission des données du fauteuil mais aussi de l'état de santé de l'utilisateur par système GSM, ou encore un système de détection d'obstacles évolué.

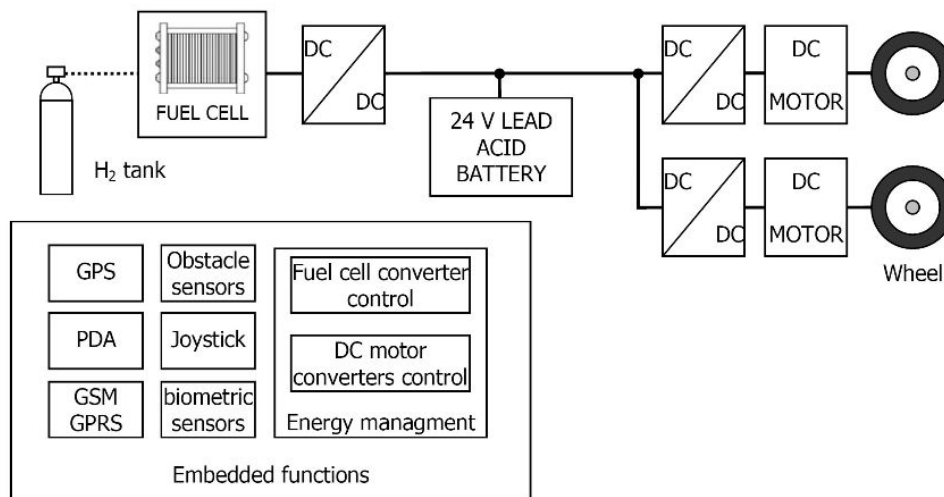
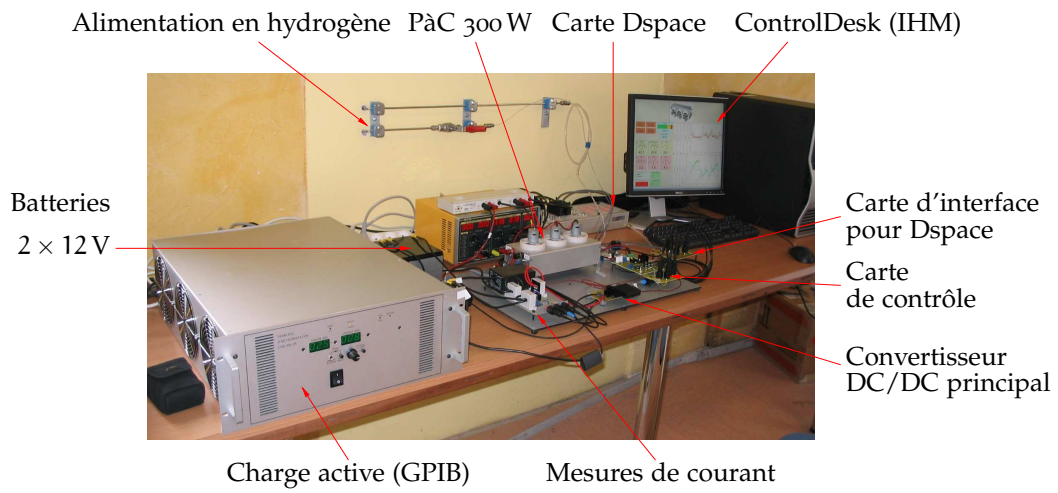


FIG. 43. Architecture interne du fauteuil roulant

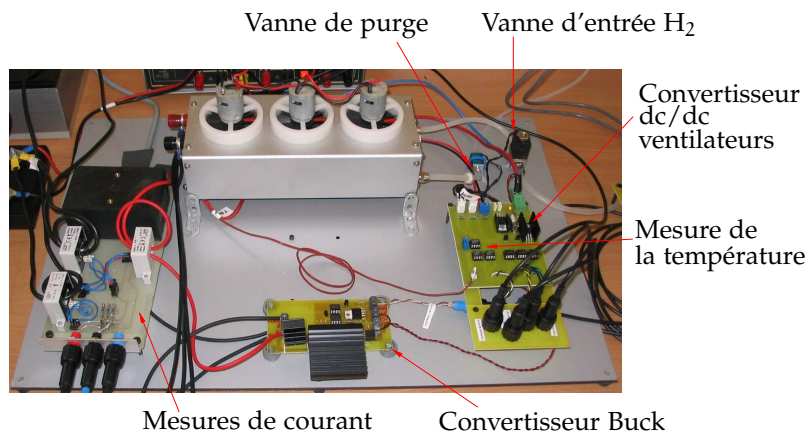
### Banc d'essai

Pour les premiers essais nous avons conçu une maquette sur table (figure 44). Les matériels utilisés sont exactement les mêmes que ceux qui seront implantés dans le fauteuil roulant. Nous avons utilisé une charge électronique active qui permet d'émuler tous les profils de courant désirés.

La figure 45 présente le fauteuil roulant hybride en phase finale d'intégration. Nous pouvons remarquer que nous utilisons pour le stockage d'hydrogène sur le fauteuil un réservoir métal hydrure d'une capacité de 275 litres sous une pression de 20 bars. D'autre



(a) Banc de test



(b) Système pile à combustible

FIG. 44. Banc de test du système pile à combustible



part la batterie au plomb utilisée auparavant a été avantageusement remplacée par une batterie NI-MH de dernière génération. Enfin on peut noter les efforts d'intégration qui ont été réalisés concernant la partie électronique de puissance. A ce stade, il reste à terminer la partie hydrogène sur le fauteuil.

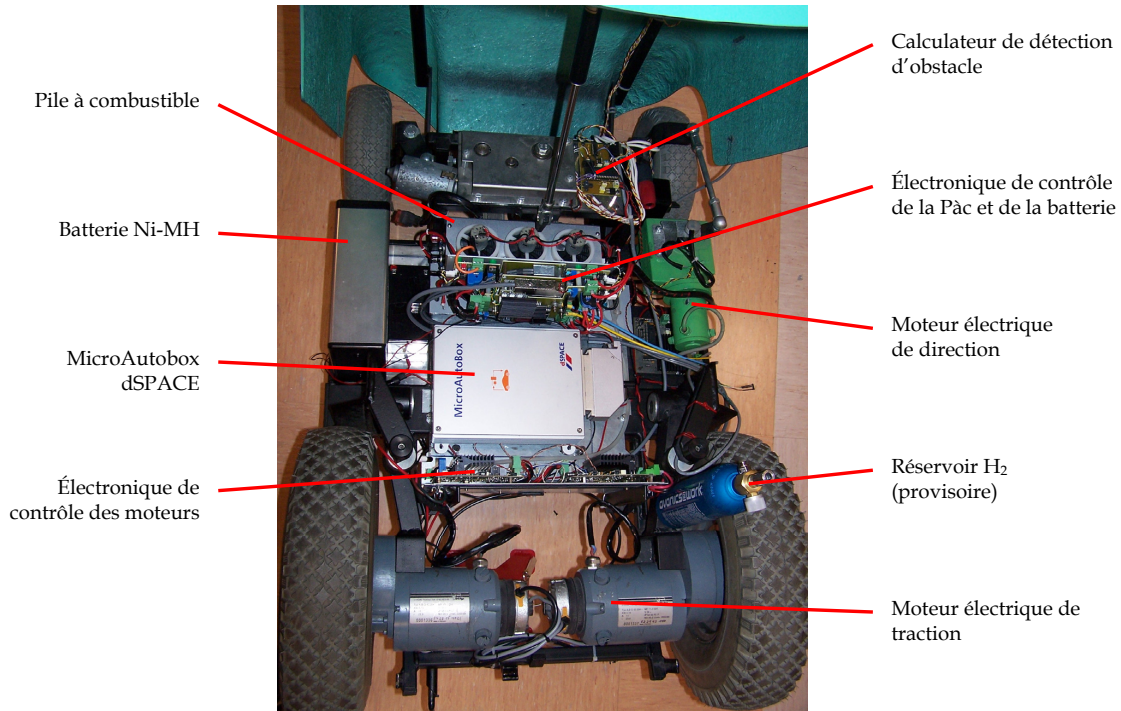


FIG. 45. Fauteuil roulant hybride en cours de montage

## 2.3 BANC D'ESSAI HYBRIDE

### 2.3.1 Présentation

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, les véhicules électriques et hybrides sont constitués de différents composants et organes :

- la (ou les) source d'énergie, son stockage et sa conversion,
- la (ou les) motorisation,
- la transmission mécanique et/ou électronique (pour les véhicules complètement électriques),
- la commande et la gestion des différents composants (outils de commande, cartes électroniques, Bus véhiculant la puissance et l'information...).

Chaque organe possède sa propre physique mais également une dynamique appropriée. Il constitue à lui seul un sous système nécessitant ainsi une approche de modélisation et de simulation bien particulière.

Nous avons choisi de concevoir un banc de test d'essai modulaire permettant d'évaluer les différentes technologies émergentes dans le domaine des motorisations électriques et hybrides. En effet, l'une des approches actuellement développées à l'UTBM, dans l'objectif d'optimiser des chaînes de motorisations des véhicules consiste à comparer différentes architectures en fonction des technologies disponibles.

D'autre part, le banc doit pouvoir être utilisé dans la validation et la correction des modèles de conception et de contrôle-commande. La modularité escomptée concernant tous les composants de la chaîne de motorisation des véhicules électriques et hybrides, les stratégies de commande développées pourront alors être validées et/ou améliorées et cela en partant du composant au système et vice et versa.

Ce banc d'essai accompagnera le développement de l'outil de dimensionnement énergétique intégré et modulaire, basé sur des modèles physiques dont la précision est à plusieurs niveaux selon l'usage. Cet outil servira à l'optimisation, au dimensionnement et à la conception des architectures hybrides par une approche de prototypage virtuel rapide.

Afin de rester dans des dimensions raisonnables mais suffisamment représentatives d'un système réel, nous avons choisi d'utiliser comme référence un véhicule automobile ramené à l'échelle un quart d'un point du vue puissance.

Il a été nécessaire dans un premier temps de réaliser une recherche d'éléments techniques (sources, charges, électronique de puissance, etc.) pouvant s'interconnecter le plus facilement possible. En parallèle, nous avons choisi de dimensionner le banc par un outil de CAO afin d'optimiser son architecture et sa modularité. La version finale de l'étude CAO est présentée sur la figure 46 et nous pouvons voir la version réelle sur la figure 47.

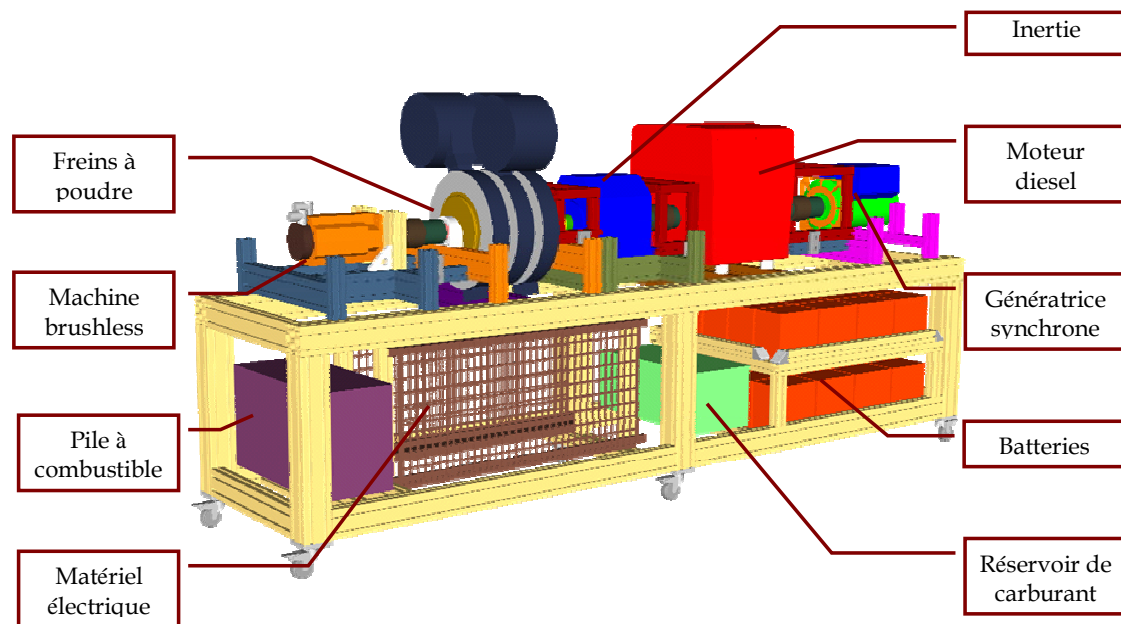


FIG. 46. CAO du banc d'essai hybride

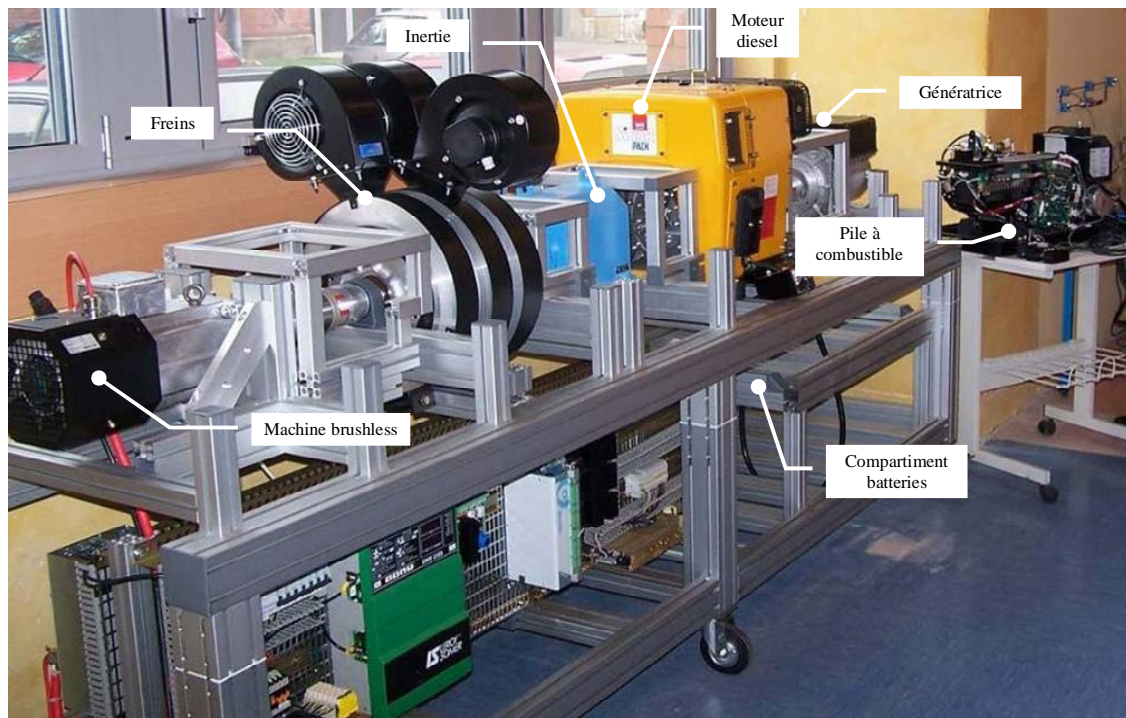


FIG. 47. Banc d'essai construit

### 2.3.2 Description du banc

#### Architectures

Dans un premier temps nous avons retenu trois architectures principales : une structure toute électrique, une structure série et une structure parallèle. Avec chacune de ces architectures, il est possible d'utiliser une ou plusieurs sources avec un bon nombre de combinaisons possibles ; le tableau 14 présente les 32 combinaisons les plus intéressantes.

Enfin, le laboratoire va acquérir prochainement une charge électronique active compatible avec le bus continu du banc. Nous pourrions ainsi encore ajouter un élément consommateur d'énergie correspondant aux auxiliaires électriques que l'on peut trouver dans un véhicule réel qui ont des puissances parfois non négligeables tels que :

- groupe de climatisation : 3 kW,
- direction assistée : 2 kW,
- désembuage électrique : 1 kW,
- éclairages : 400 W,
- etc.

On peut remarquer que la puissance ces équipements auxiliaires progresse d'environ 150 W/an [15].

Dans ce qui suit, le système pile à combustible ne sera pas utilisé car le convertisseur de puissance qui lui est associé est en cours de réalisation. Toutefois le système PàC a été acquis et caractérisé.

**ARCHITECTURES SÉRIE ET TOUT ÉLECTRIQUE** Le schéma de l'architecture est présenté sur la figure 48. Dans les configurations série et tout électrique, l'énergie mécanique alimentant la charge (constituée du frein et de l'inertie) est produite uniquement par le moteur électrique de traction. Ce dernier est alimenté par un bus continu via un convertisseur de puissance. Toutes les autres sources (moteur diesel et alternateur, réseau triphasé, batteries ou supercondensateurs) sont toutes interconnectées au même bus continu et sont utilisables à la guise de l'utilisateur. On remarquera que seules les batteries sont connectées directement au bus continu sans utiliser de convertisseur ; elles fixeront donc la tension du bus. Néanmoins il est tout à fait possible de déconnecter les batteries et de piloter un des convertisseurs de puissance en régulation de tension afin de réguler la tension du bus. Le réseau triphasé est présent afin de pouvoir recharger les batteries sans utiliser le moteur diesel.

**ARCHITECTURE PARALLÈLE** L'architecture parallèle est présentée sur la figure 49. Dans ce cas, le moteur électrique de traction, le moteur diesel ainsi que la charge sont interconnectés mécaniquement. Nous retrouvons ensuite la batterie, le réseau triphasé et les supercondensateurs connectés au bus continu. Là encore, la batterie fixe le niveau de tension du bus continu.

Moteur thermique seul	Pile à combustible	Supercondensateurs	Batterie	Moteur thermique + alternateur	Moteur électrique	Charge mécanique	Type architecture
				X	X	X	Hybride série
			X	X	X	X	Hybride série
			X		X	X	Tout élec.
	X			X	X	X	Hybride série
	X				X	X	Hybride élec
	X	X		X	X	X	Hybride série
	X	X	X				électrique
	X	X			X	X	Hybride électrique
X				X	X	X	Hybride série
X		X		X	X	X	Hybride série
X		X	X				électrique
X		X			X	X	Hybride série
X	X			X	X	X	Hybride série
X	X				X	X	Hybride série
X	X	X		X	X	X	Hybride série
X	X	X	X				électrique
X	X	X			X	X	Hybride série
X					X		Directe
X					X	X	Hybride parallèle
X		X			X	X	Hybride parallèle
X		X			X	X	Hybride parallèle
X	X				X	X	Hybride parallèle
X	X				X	X	Hybride parallèle
X	X	X			X	X	Hybride parallèle
X	X	X			X	X	Hybride parallèle
X	X	X	X		X	X	Hybride parallèle
X	X	X	X		X	X	Hybride parallèle

TAB. 14. Combinaisons possibles proposées par le banc hybride

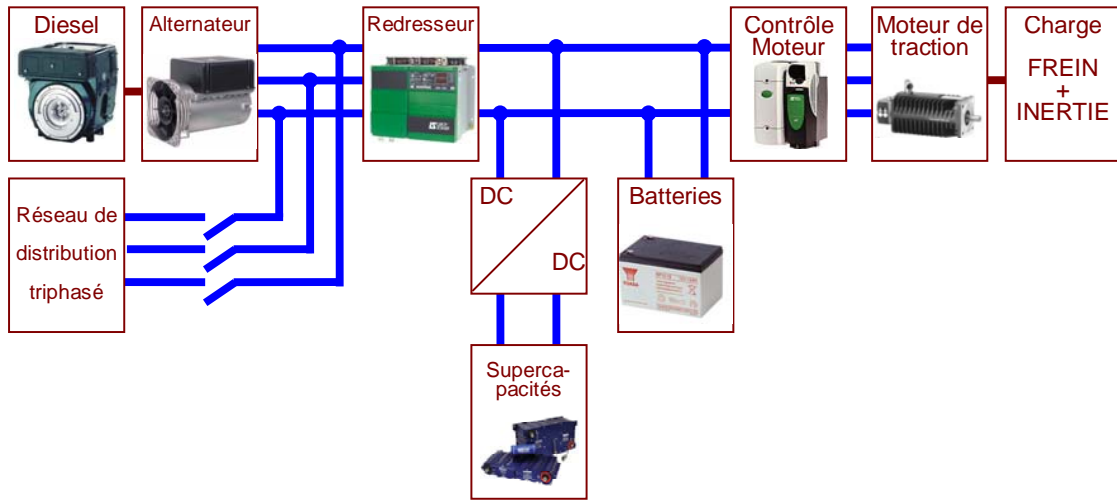


FIG. 48. Architecture série

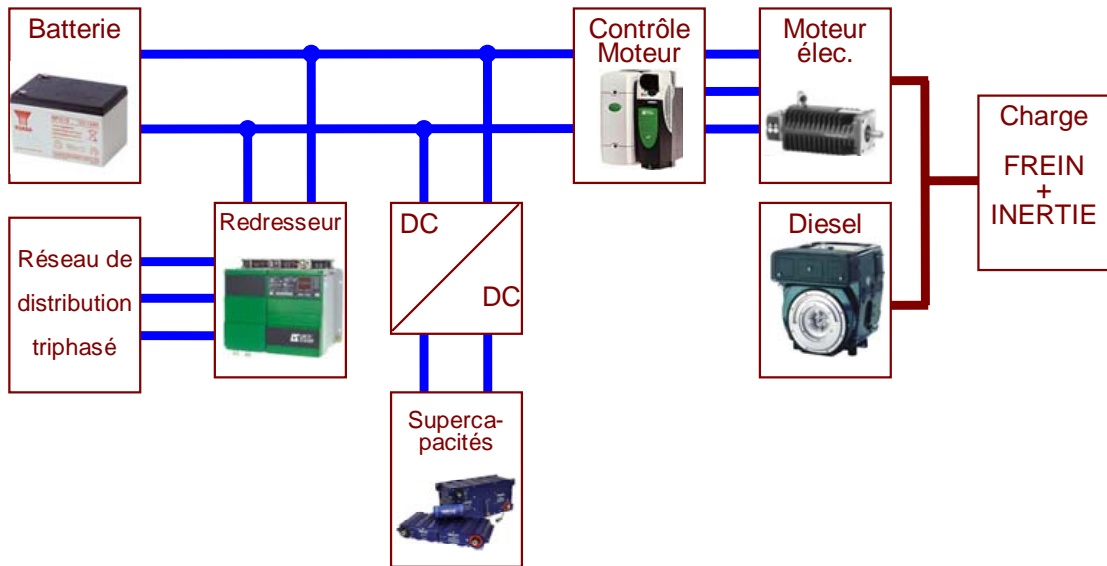


FIG. 49. Architecture parallèle

### 2.3.3 Dimensionnement et choix des composants

#### *Châssis*

Nous avons opté pour un châssis composé de profilés en aluminium. Ces profilés spécifiques permettent d'obtenir une grande flexibilité de montage en proposant des solutions d'interconnexion simples et robustes. Ce système permet par exemple d'obtenir une solution simple pour aligner la ligne d'arbre du banc (voir figure 47). Enfin le fournisseur propose sur Internet tous les éléments de son catalogue qui sont directement intégrables à notre outil de CAO.

#### *Bus continu et la batterie*

Tous les transferts d'énergie entre les différentes sources d'énergie du banc se feront à travers le bus continu du banc. Nous avons choisi d'utiliser une tension d'environ 290 volts. Cette tension doit bien entendu être compatible avec les différents éléments interconnectés sur le bus. Cette contrainte de tension a été imposée par le convertisseur du moteur de traction qui tolère une tension de bus comprise entre 250 et 330 volts.

Nous avons vu que dans notre cas c'est la batterie qui va fixer la tension du bus. Nous avons choisi d'utiliser 23 accumulateurs de 12,8 volts (tension à pleine charge) de technologie plomb-acide avec électrolyte gélifié montés en série. Nous avons opté pour la technologie plomb sur un critère financier car c'est la technologie meilleure marché actuellement ; de plus elle est bien adaptée à la traction électrique. D'autre part, les critères de volume et de masse ne sont pas prédominants dans notre cas car nous sommes sur un banc d'essai statique.

Les éléments ont les caractéristiques suivantes :

- Tension nominale : 12 V
- Tension maximale : 12,8 V
- Capacité mesurée lors d'une décharge de 10 heures avec une tension d'arrêt fixée à 10,5 volts : 11,2 Ah
- Résistance interne : 30 mΩ
- Courant de décharge maximal : 84 A
- Poids : 4,09 kg
- Volume : 1,44 l
- Energie spécifique : 35,05 Wh/kg
- Densité d'énergie : 99,56 Wh/l

#### *Moteur thermique diesel*

Il était impératif d'installer sur ce banc d'essai un moteur thermique afin de pouvoir explorer la problématique des véhicules hybrides à moteur thermique que l'on commence à croiser sur nos routes. Le souci majeur a été de trouver un moteur thermique suffisamment compact pour pouvoir garder l'aspect modulaire du banc tout en ayant une bonne représentativité des moteurs installés dans les voitures. Nous nous sommes donc tournés vers un moteur diesel à injection directe monocylindre. Ce moteur dispose de deux atouts intéressants : d'une part, il est encapsulé ce qui permet une réduction significative du bruit et d'autre part, il dispose de deux sorties d'arbre ce qui facilitera le changement

d'architecture (série ou parallèle) sans avoir à démonter le moteur. Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

- Cylindrée : 0,413 l
- Vitesse nominale : 3 000 tr/min
- Puissance maximale : 5,2 kW @ 3 600 tr/min
- Couple maximal : 17,8 N · m @ 2 000 tr/min
- Consommation maximale : 340 g/kWh @ 3 600 tr/min
- Poids : 92 kg
- Démarreur et alternateur 12 volts intégrés

Pour pouvoir ajuster la vitesse de rotation du moteur thermique, nous avons installé un vérin électrique qui permet de commander l'accélérateur du moteur depuis le système de supervision.

#### *Alternateur*

Nous souhaitons utiliser une génératrice de bonne qualité compatible avec la puissance du moteur diesel. Notre choix s'est porté sur un alternateur Leroy Somer ayant les caractéristiques suivantes :

- Alternateur triphasé à une paire de pôle (machine synchrone)
- Vitesse nominale à 50 Hz : 3 000 tr/min
- Puissance nominale : 6,5 kVA
- Tension nominale 400 V (couplage étoile)
- Auto excitation par système compound à diodes tournantes

#### *Convertisseur de puissance de l'alternateur*

Le rôle du convertisseur de puissance monté en sortie de l'alternateur est d'une part d'adapter la tension de sortie de la machine (400 volts alternatifs triphasé) au bus continu (290 volts continu) et d'autre part de contrôler le courant injecté par l'alternateur sur ce même bus. Deux solutions étaient envisageables dans un premier temps. Utiliser un convertisseur commandé de type redresseur MLI ou utiliser deux convertisseurs associés en série : redresseur triphasé et hacheur abaisseur. L'avantage du premier est de proposer une solution compacte avec un bon rendement global mais le contrôle du pont est assez complexe. L'alternance des sources est réalisée à l'aide des inductances du stator de l'alternateur. Le schéma de principe de cette structure est présenté par la figure 50. Le seul bémol à ce montage est qu'il fonctionne uniquement en élévateur ce qui n'est pas le cas sur notre banc (génératrice 400 V triphasée et bus continu de 290 V).

Nous avons retenu le deuxième montage d'une part dû à sa simplicité de commande et d'autre part car nous avons les composants à disposition au laboratoire ; par contre le rendement de l'ensemble est moins bon que le premier montage. Comme le montre la figure 51, il est nécessaire d'ajouter un élément inductif afin d'assurer la compatibilité des sources.

Le convertisseur a été réalisé par nos soins. Nous utilisons un pont redresseur triphasé tout intégré ainsi qu'un bras de pont d'IGBT. Ce dernier est commandé à l'aide d'un driver spécifique assurant l'isolation galvanique entre la puissance et le signal de commande bas niveau. Les composants de puissance ont été dimensionnés pour un courant nomi-



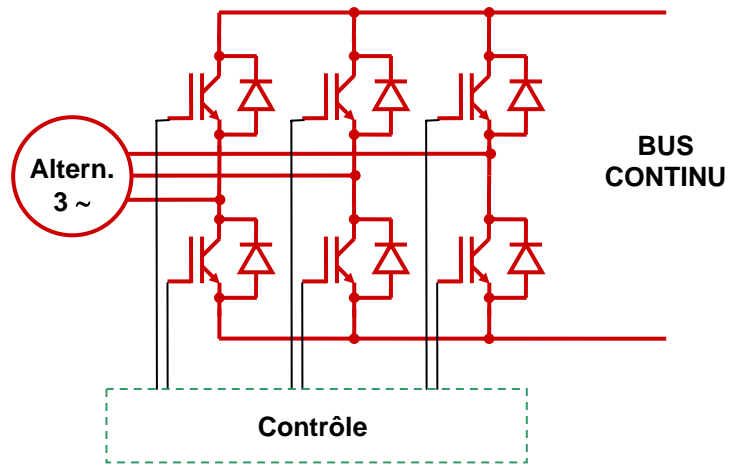


FIG. 50. Redresseur MLI

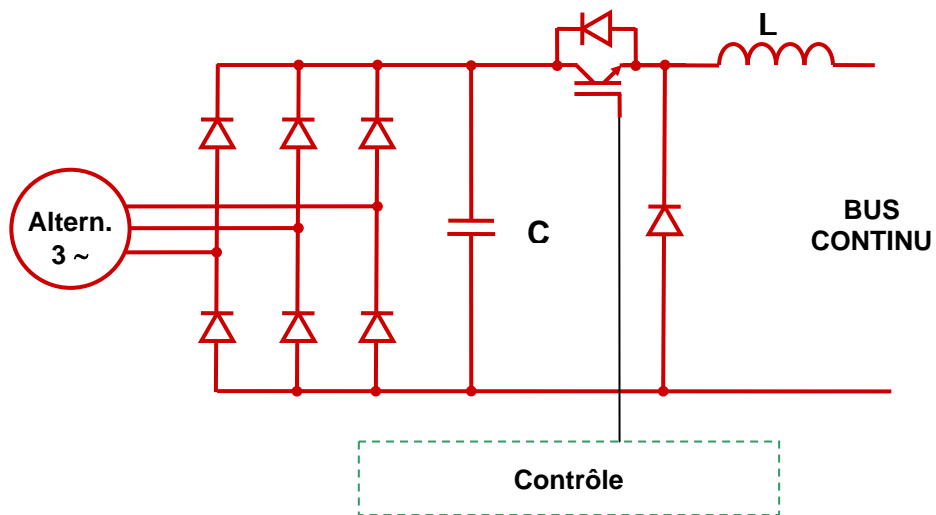


FIG. 51. Association redresseur et hacheur

nal de 35 ampères. Nous avons opté pour une inductance à noyau ferrite calculée pour fonctionner à une fréquence de découpage de 15 kHz, avec une ondulation de courant de 10 % sous un courant nominal de 20 ampères.

#### *Moteur électrique et convertisseur associé*

Le moteur de traction électrique est celui qui va entraîner la charge mécanique du banc (frein et inertie). Nous avons choisi ici une machine de très bonne qualité de type synchrone à aimants permanents. Ce type de moteur offre actuellement les meilleures performances d'un point de vue couple massique et puissance massique. C'est une solution qui commence à émerger dans les véhicules électriques et hybrides de nouvelle génération. Des solutions d'entraînement plus classiques existent aussi ; elles sont basées pour les plus anciennes sur des machines à courant continu à excitation séparée ou encore sur des machines asynchrones associées à un contrôle vectoriel de flux.

Le convertisseur de puissance pilotant la machine synchrone à aimants permanents est un onduleur. À partir de la mesure de position du rotor de la machine issue d'un synchro-résolveur monté sur l'arbre du moteur, il commande de façon ordonnée les différents interrupteurs de puissance. En général, les fabricants de moteurs proposent aussi le convertisseur associé afin de garantir les performances optimales de la machine. Dans notre cas, l'ensemble convertisseur moteur a été acheté chez le même fournisseur. De plus le convertisseur retenu intègre déjà le contrôle de la vitesse et/ou du couple de la machine.

Les caractéristiques du moteur sont les suivantes :

- Puissance nominale : 5 kW
- Couple nominal : 23 N · m (30 N · m à vitesse lente)
- Couple maximal (phases transitoires) : 90 N · m
- Vitesse maximale : 3 300 tr/min
- Poids : 20 kg

Les caractéristiques de l'onduleur associé au moteur sont les suivantes :

- Alimentation monophasée 230 V alternative ou 290 V continu
- Courant crête permanent : 60 A
- Courant crête impulsif : 100 A
- Consigne de vitesse/couple analogique ( $\pm 10$  volts) ou numérique
- Sorties analogiques (mesure vitesse et couple)

#### *Charge mécanique*

La charge mécanique est présente pour simuler le véhicule. Elle est constituée d'un frein associé à une inertie. Le frein représentera le couple exercé sur la roue de la voiture par la force de résistance au roulement au niveau du pneumatique associée aussi à la pente de la route et la force aérodynamique exercée sur la carrosserie. L'inertie quant à elle représentera le couple ramené à l'axe de la roue reproduisant les effets de la masse du véhicule lors des variations de vitesse.

Le frein choisi utilise la technologie de type frein à poudre. Il est constitué d'un rotor massif, d'un bobinage situé au stator, et d'un entrefer dans lequel se trouve une poudre

similaire à de la limaille de fer. Lorsque qu'un courant circule au stator, le champ magnétique produit dans l'entrefer à pour effet de réaliser des liaisons mécaniques entre le stator et le rotor par l'intermédiaire de la poudre magnétique. Ces liaisons sont rompues grâce au couple exercé sur l'arbre du frein. L'énergie qui en découle est entièrement dissipée en chaleur. Les gros avantages de ce type de frein sont d'une part la compacité du système, un rapport courant de commande/couple de freinage très élevé (1 ampère peut générer des couples de plus de 1 000 N · m sur certains freins) et enfin une installation mécanique très aisée. L'inconvénient majeur de ce frein est la présence d'un couple résistant minimal sans présence de courant. Nous avons choisi un frein avec les caractéristiques suivantes :

- Assemblage de 3 freins type FRAT2002 sous chargés montés sur le même arbre
- Vitesse maximale : 3 000 tr/min
- Couple maximal permanent : 30 N · m
- Couple minimal : 2 N · m
- Ventilation forcée

Concernant l'inertie, elle représente la masse du véhicule. Après bon nombre de consultations auprès de différents fournisseurs, nous avons choisi une inertie représentative d'un véhicule d'une masse d'environ 326 kg. Il faut remarquer que pour obtenir cette masse, nous avons pris en compte les inerties des différentes parties tournantes de la ligne d'arbre ajoutées à l'inertie proprement dite ; inertie du rotor du moteur synchrone à aimant permanent, inertie des rotors des freins et inertie de l'arbre de transmission. Les caractéristiques de l'inertie sont les suivantes :

- Inertie : 0,2 kg · m<sup>2</sup>
- Vitesse maximale : 8 000 tr/min
- Double sortie d'arbre
- Cage de protection mécano-soudée de 5 mm d'épaisseur

#### *Supercondensateurs et convertisseur associé*

Pour notre application, nous avons choisi des packs de supercondensateurs équipés d'un système d'équilibrage actif. En effet, ces composants ont une tension de cellule unitaire de 2,5 volts maximum. Il est donc impératif qu'aucune cellule du pack de supercondensateur ne dépasse cette limite. Un système d'équilibrage permet donc d'équilibrer les tensions de cellules entre elles. En pratique, il s'agit d'un petit circuit électronique qui se monte en parallèle de la supercapacité et qui dévie le courant sur la cellule voisine si la tension maximale est atteinte. Nous avons à disposition au laboratoire des packs de supercondensateurs ayant les caractéristiques suivantes :

- Capacité : 58 F
- Tension maximale : 15 V
- Résistance série : 180 mΩ
- Résistance d'auto décharge : 2 000 Ω
- Dimensions : 216 × 69 × 38 × mm
- Poids : 566 g
- équilibrage dynamique intégré

Nous avons dimensionné nos composants en énergie. Nous avons choisi comme hypothèse de calcul de pouvoir récupérer toute l'énergie cinétique ( $W_{bu}$ ) emmagasinée par

notre véhicule roulant à 60 km/h ( $v_V$ ).

Nous avons :

$$W_{bu} = \frac{1}{2} M_V v_V^2 = \frac{1}{2} 326 \left( \frac{60}{3,6} \right)^2 = 45\,387 \text{ J} \quad (2.1)$$

Nous cherchons maintenant à déterminer le nombre de supercondensateurs que nous devons utiliser. D'autre part, il ne faut pas perdre de vue que les supercondensateurs seront connectés au bus continu par l'intermédiaire d'un hacheur réversible en courant. En général, le rendement de ce type de convertisseur de puissance baisse lorsque le rapport d'élévation de tension est élevé. Il convient en général de ne pas dépasser un facteur d'élévation de 3 à 4 pour conserver des rendements corrects. Cela signifie que nous ne pouvons pas exploiter toute l'énergie disponible dans le supercondensateur puisque l'on ne va pas décharger le composant entièrement [2].

**DIMENSIONNEMENT D'UN BANC DE SUPERCONDENSATEURS** La première étape du dimensionnement d'un banc de supercondensateurs est d'identifier quels sont les besoins en *énergie* et en *puissance*. Ces besoins définiront le nombre de supercondensateurs utiles à l'application.

Cependant, les besoins en énergie et les besoins en puissance ne répondent pas forcément aux mêmes contraintes [3] :

- le *profil énergétique* du système donnera directement la quantité d'énergie que les supercondensateurs auront à fournir durant la décharge et l'énergie à fournir durant la charge.
- le *profil de puissance* définit les contraintes du banc de supercondensateurs. En effet, les supercondensateurs ont une densité de puissance limitée et ce paramètre doit être pris en compte. Si la puissance du système n'est pas compatible avec la densité de puissance et le nombre de supercondensateurs (déterminés par le profil énergétique), le nombre de supercondensateurs devra être augmenté.

**Dimensionnement suivant le profil énergétique** Si le banc de supercondensateurs est dimensionné en ne prenant en compte que les besoins énergétiques, et en considérant des condensateurs idéaux, les équations définissant les propriétés des supercondensateurs sont :

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} \quad (2.2)$$

$$W = \frac{1}{2} C u_c^2 \quad (2.3)$$

où  $i_c$  est le courant des supercondensateurs,  $u_c$  la tension aux bornes d'un supercondensateur,  $C$  la capacité du supercondensateur et  $W$  l'énergie *stockée* dans le supercondensateur.

Certaines contraintes sont à prendre en considération :

1. la tension aux bornes du supercondensateur ne doit pas dépasser une valeur maximale  $U_M$  qui vaut typiquement 2,5 volts afin de ne pas détériorer ou limiter la durée de vie du composant ;

2. toute l'énergie stockée  $W$  n'est pas utilisable. Si toute l'énergie était utilisée, cela reviendrait à faire diminuer la tension aux bornes du composant de  $U_M$  à 0 volts. Plus la tension aux bornes du supercondensateur diminue, plus le courant délivré augmente et à zéro volts, le courant serait donc infini. Une tension minimale  $U_m$  doit donc être déterminée et par conséquent toute l'énergie stockée ne sera pas utilisée.

À partir de ces deux contraintes, on définit un paramètre  $d$  (pourcentage) qui est le rapport entre la tension minimale  $U_m$  et la tension maximale  $U_M$  :

$$d = \frac{U_m}{U_M} 100 \quad (2.4)$$

où  $U_m$  est la tension minimale du supercondensateur (en fin de décharge) et  $U_M$  la tension maximale du supercondensateur (en fin de charge).

L'énergie utilisable  $W_u$  sera donc :

$$W_u = \frac{1}{2} C U_M^2 - \frac{1}{2} C U_m^2 = \frac{1}{2} C U_M^2 \cdot \left( 1 - \left( \frac{d}{100} \right)^2 \right) \quad (2.5)$$

La figure 52 représente la variation de l'énergie utilisable en fonction de la variation de  $d$ . En pratique, la valeur de  $d$  est fixée à 50 % ; cela permet de limiter les contraintes sur le convertisseur de puissance tout en exploitant 75 % de l'énergie disponible dans le supercondensateur.

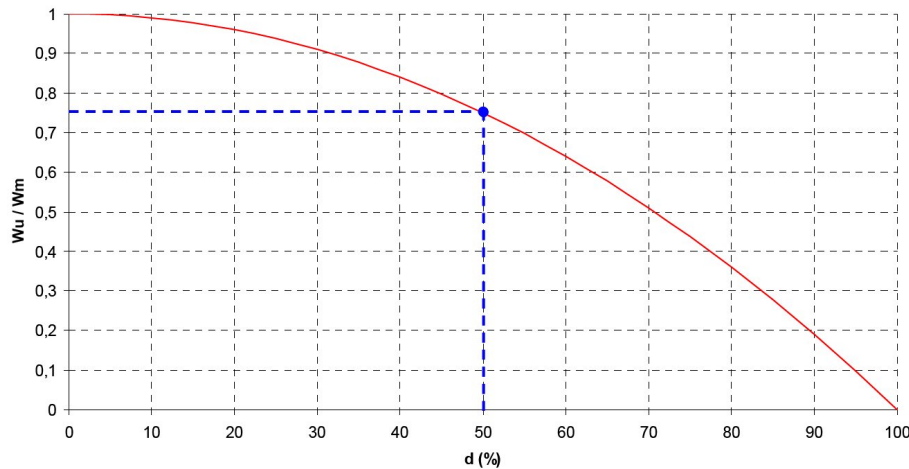


FIG. 52. Variation de l'énergie disponible dans un supercondensateur en fonction de  $d$

Pour un banc de supercondensateurs contenant  $n$  composants, l'énergie disponible  $W_{bu}$  sera donc

$$W_{bu} = n \cdot W_u \quad (2.6)$$

Le nombre de supercondensateurs déterminé par le dimensionnement par l'énergie est donc donné en utilisant les équations (2.5) et (2.6) :

$$n = \frac{2 \cdot W_{bu}}{C U_M^2 \cdot \left(1 - \left(\frac{d}{100}\right)^2\right)} \quad (2.7)$$

Nous pouvons maintenant calculer le nombre de supercondensateurs  $n$  nécessaire en faisant l'hypothèse que toute l'énergie cinétique du véhicule peut être récupérée avec  $d = 50\%$ . Nos packs de supercondensateurs ont les caractéristiques suivantes : 58 F (C) et 15 volts ( $U_M$ ). En utilisant la relation suivante, nous obtenons :

$$n = \frac{2 \cdot 45387}{58 \cdot 15^2 \left[1 - \left(\frac{50}{100}\right)^2\right]} = 9,27 \quad (2.8)$$

Il faut donc utiliser 10 packs de supercondensateurs montés en série. La plage de tension de l'ensemble sera donc comprise entre 75 et 150 volts. Sachant que notre bus continu est à 290 volts, nous pouvons estimer que le facteur d'élévation du hacheur reste dans la norme. Néanmoins, si nous voulons améliorer le rendement du convertisseur, nous pourrions toujours augmenter le nombre d'éléments en série.

**Rendement énergétique d'un supercondensateur** Des convertisseurs statiques sont utilisés pour contrôler le courant de charge et de décharge des supercondensateurs. Ce contrôle du courant permet de contrôler les variations de tensions aux bornes des supercondensateurs.

Deux stratégies sont employées concernant la décharge (charge) des supercondensateurs :

- la décharge (charge) à courant constant ;
- la décharge (charge) à puissance constante : le courant des supercondensateurs est ajusté afin d'avoir le produit  $u_e \times i_c$  constant ( $u_e$  étant la tension aux bornes du supercondensateur en prenant en compte la résistance série interne).

**Décharge à courant constant** La résistance série interne  $r_1$  induit des pertes et l'énergie dissipée  $W_r$  par les résistances en série (plusieurs supercondensateurs sont en série) a pour expression :

$$W_r = n r_1 C U_M i_c \frac{100 - d}{100} \quad (2.9)$$

où  $W_r$  est l'énergie dissipée dans les résistances série internes des supercondensateurs et  $r_1$  la résistance série interne d'un supercondensateur.

L'énergie injectée  $W_T$  dans le convertisseur a alors pour expression

$$W_T = W_{bu} - W_r \quad (2.10)$$

Le temps de décharge du supercondensateur est donné par

$$T_{ch} = C \frac{U_M}{i_c} \frac{100 - d}{100} \quad (2.11)$$

Le rendement énergétique  $\eta_i$  de la décharge à *courant constant* est donc

$$\eta_i = \frac{W_T}{W_{bu}} = 1 - 2r_1 \frac{i_c}{U_M} \cdot \frac{100}{100+d} = 1 - 2r_1 C \frac{1}{T_{ch}} \frac{100-d}{100+d} \quad (2.12)$$

**Décharge à puissance constante** Lors d'une décharge, la tension aux bornes des supercondensateurs diminue. Afin de maintenir la puissance constante (décharge à puissance constante), il faut donc augmenter le courant  $i_c$  délivré par les supercondensateurs. Ce courant a pour expression :

$$i_c = \frac{1}{2r_1} u_c - \frac{1}{2r_1} \sqrt{u_c^2 - 4 \frac{r_1 P}{n}} \quad (2.13)$$

L'expression de  $W_T$  dans le cas d'une décharge à courant est la suivante [3] :

$$W_T = \frac{1}{2} C \left( 2 \frac{r_1 P}{n} \ln \left( \frac{u_{(t=T_{ch})}}{u_{(t=0)}} \right) - u_{(t=T_{ch})}^2 + u_{(t=0)}^2 \right) \quad (2.14)$$

Avec

$$u_{(t=0)} = \frac{1}{2} U_M + \frac{1}{2} \sqrt{U_M^2 - 4 \frac{r_1 P}{n}}$$

$$u_{(t=T_{ch})} = \frac{1}{2} U_M \frac{d}{100} + \frac{1}{2} \sqrt{\left( U_M \frac{d}{100} \right)^2 - 4 \frac{r_1 P}{n}}$$

où  $P$  est la puissance de décharge des supercondensateurs,  $t$  le temps et  $T_{ch}$  le temps de décharge du supercondensateur.

On en déduit donc le rendement énergétique  $\eta_p$  d'une décharge à *puissance constante* :

$$\eta_p = \frac{W_T}{W_u} = \frac{2 \frac{r_1 P}{n} \ln \left( \frac{u_{(t=T_{ch})}}{u_{(t=0)}} \right) - u_{(t=T_{ch})}^2 + u_{(t=0)}^2}{U_M^2 \left( 1 - \left( \frac{d}{100} \right)^2 \right)} \quad (2.15)$$

Le temps de décharge ( $T_{ch}$ ) est donné par l'équation suivante :

$$T_{ch} = \frac{1}{2} \frac{C}{P} \cdot \left( 2 \frac{r_1 P}{n} \ln \left( \frac{u_{t=T_{ch}}}{u_{t=0}} \right) - u_{t=T_{ch}}^2 + u_{t=0}^2 \right) \quad (2.16)$$

Il faut cependant noter que pour une décharge à puissance constante, le paramètre  $d$  doit être limité, ce paramètre n'est pas arbitraire [3] :

$$d_{min} = 200 \frac{\sqrt{\frac{r_1 P}{n}}}{U_M} \quad (2.17)$$

Cette limitation a pour conséquence une limitation sur l'énergie disponible des supercondensateurs et la valeur maximale de l'énergie disponible  $W_{bu}$  devient :

$$W_{bu} = n \frac{1}{2} C U_M^2 \left( 1 - 4 \frac{r_1 P}{n U_M^2} \right) \quad (2.18)$$

Une contrainte sur la puissance maximale  $P_{max}$  est déduite des deux expressions précédentes (elle vient du fait que  $d_{min}$  ne peut pas être supérieur à 100 %) :

$$P_{max} = \frac{1}{4} \frac{n U_M^2}{r_1} \quad (2.19)$$

CONVERTISSEUR DE PUISSANCE ASSOCIÉ AUX SUPERCONDENSATEURS La structure utilisée pour le convertisseur de puissance associé aux supercondensateurs est un simple hacheur réversible en courant. La figure 53 représente le schéma de principe du convertisseur.

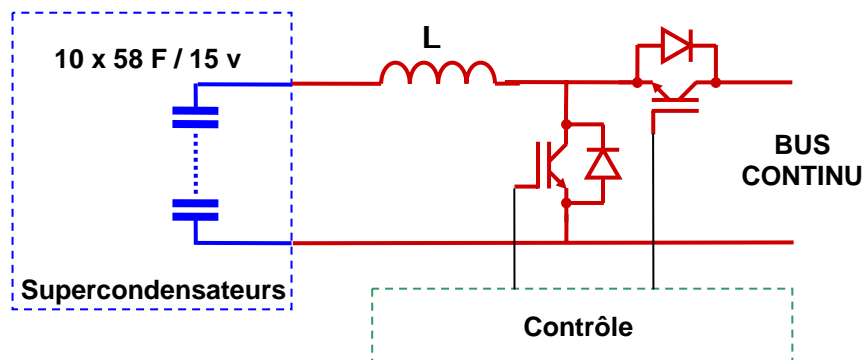


FIG. 53. Hacheur associé aux supercondensateurs

Les simulations ont montré que les courants qui transiteront dans le convertisseur ne dépasseront jamais les 100 ampères. Nous avons donc choisi d'utiliser comme bras de pont un IGBT 1 200 volts/400 ampères.

Concernant le choix de l'inductance, nous avons choisi une inductance  $L$  de 1,8 mH à air réalisée par nos soins. La fréquence de découpage  $F$  retenue est de 10 kHz.

#### 2.3.4 Les capteurs

Afin de pouvoir mesurer et contrôler le maximum de paramètre, nous avons placé un nombre assez important de capteurs. Les grandeurs à mesurer sont :

- électriques : tensions et courants
- mécaniques : vitesses de rotation et couples
- fluidiques : débits de carburant

Le Tableau 15 détaille les différents capteurs utilisés avec leur gamme de mesure et leur précision.

#### 2.3.5 Contrôle du système et prototypage rapide

Le prototypage rapide est un système informatique qui permet de développer des logiciels pour calculateurs embarqués ou des éléments de commande de systèmes méca-



CAPTEUR	CARACTÉRISTIQUES	GAMME DE MESURE PRÉCISION
Tension batterie, Tension bus continu, Tension ...	Capteur de tension isolé à effet Hall associé à une résistance de précision	0.. ±400 volts ± 0,7 %, résistance à 0,1 % compensée en température
Tension supercondensateurs	Capteur de tension isolé à effet Hall associé à une résistance de précision	0.. ±150 volts ± 0,7 %, résistance à 0,1 % compensée en température
Courant bus continu, courant batterie, courant onduleur	Capteur de courant isolé à effet Hall associé à une résistance de précision	0.. ±70 ampères ± 0,5 %, résistance à 0,1 % compensée en température
Courant supercondensateur et courant supercondensateur côté bus	Capteur de courant isolé à effet Hall associé à une résistance de précision	0.. ±300 ampères ± 0,8 %, résistance à 0,1 % compensée en température
Couple et vitesse moteur diesel, couple et vitesse moteur de traction	Capteur combiné de vitesse et de couple sans contact	0.. ±50 Nm ± 0,5 %, 0.. ±9000 tr/min ± 1 %
Débit carburant aller et retour moteur diesel	Débitmètre à palettes pour carburant de type gasoil	0.. 0,5 l/min ± 0,8 %

TAB. 15. Caractéristiques des capteurs utilisés

troniques. L'avantage majeur est de pouvoir simuler des lois de contrôle/commande et de pouvoir les transposer immédiatement dans le système réel à contrôler. Actuellement, la majeure partie des industriels impliqués dans le transport terrestre et aérien (PSA, Renault, BMW, VAG, Airbus, ...) utilise ces outils. Le leader sur le marché proposant ce type d'équipement est la société dSPACE. Le point fort de l'outil dSPACE est d'utiliser le support Matlab Simulink pour concevoir le système et d'utiliser l'outil RTI (Real Time Interface) afin d'exporter l'application sur un système de contrôle/commande à base de microprocesseur temps réel et DSP. Ce système de contrôle/commande permet de communiquer avec le système réel à contrôler. La supervision, le diagnostic et la modification de paramètres se font à l'aide d'un logiciel qui permet de créer une interface graphique sur un PC telle que par exemple un tableau de bord automobile.

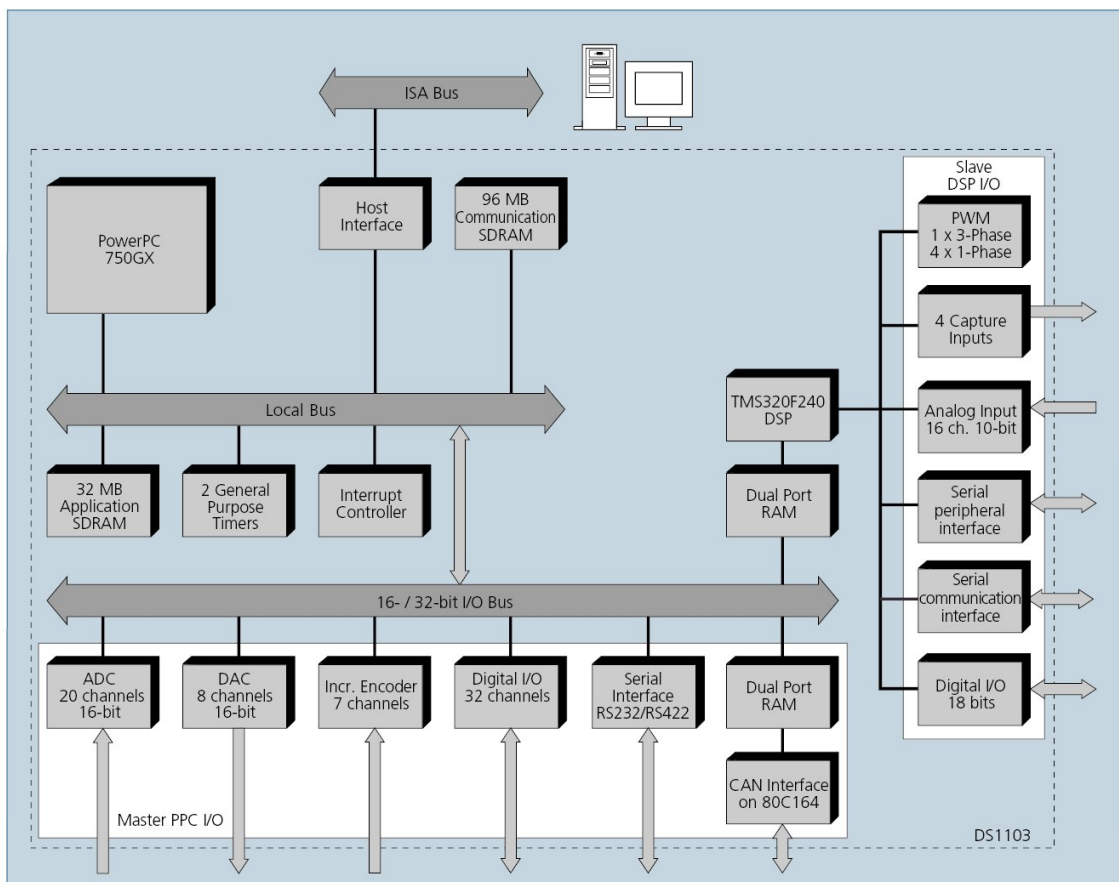


FIG. 54. Architecture interne de la carte DS1103

L'outil de prototypage rapide utilisé dans notre application est un système DS1103. Son architecture interne est présentée sur la figure 54. Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

- Processeur Power PC cadencé à 1 GHz :
- 32 Mo de SDRAM pour le programme ;

- 4x4 entrées analogiques multiplexées 16 bits  $\pm 10$  V 1  $\mu$ s ;
- 4 entrées analogiques parallèles 16 bits  $\pm 10$  V 800 ns ;
- 8 sorties analogiques 10 bits  $\pm 10$  V 5  $\mu$ s ;
- 32 entrées/sorties TTL ;
- 6 entrées codeur incrémental 24 bits ;
- Interface bus CAN 1 Mbits/s ;
- DSP esclave cadence 20 MHz :
  - 16 entrées analogiques  $\pm 10$  V 1  $\mu$ s ;
  - 10 sorties PWM ;
  - 2 ports série ;
  - 4 entrées de capture.

Les lois de gestion sont simulées dans un premier temps à l'aide de Matlab-Simulink. Une fois validées, il suffit de remplacer les entrées sorties virtuelles par les entrées capteurs (couples, vitesses, courants, tensions...) et les sorties destinées aux différents actionneurs (sorties PWM, consignes analogiques...) à l'aide de la bibliothèque dSPACE de Simulink. Par la suite, le schéma bloc est compilé et envoyé dans la cible temps réel. A la fin de cette étape, la stratégie de commande est activée. Grâce au logiciel Control Desk, il est possible de développer une interface de dialogue conviviale avec le système permettant de contrôler le bon fonctionnement, enregistrer des données mais surtout modifier des paramètres du code en temps réel : par exemple faire varier le gain d'un correcteur PID. Enfin il est possible d'automatiser les tests à l'aide d'un script programmé avec le langage Python. La démarche d'élaboration est illustrée par la figure 55.

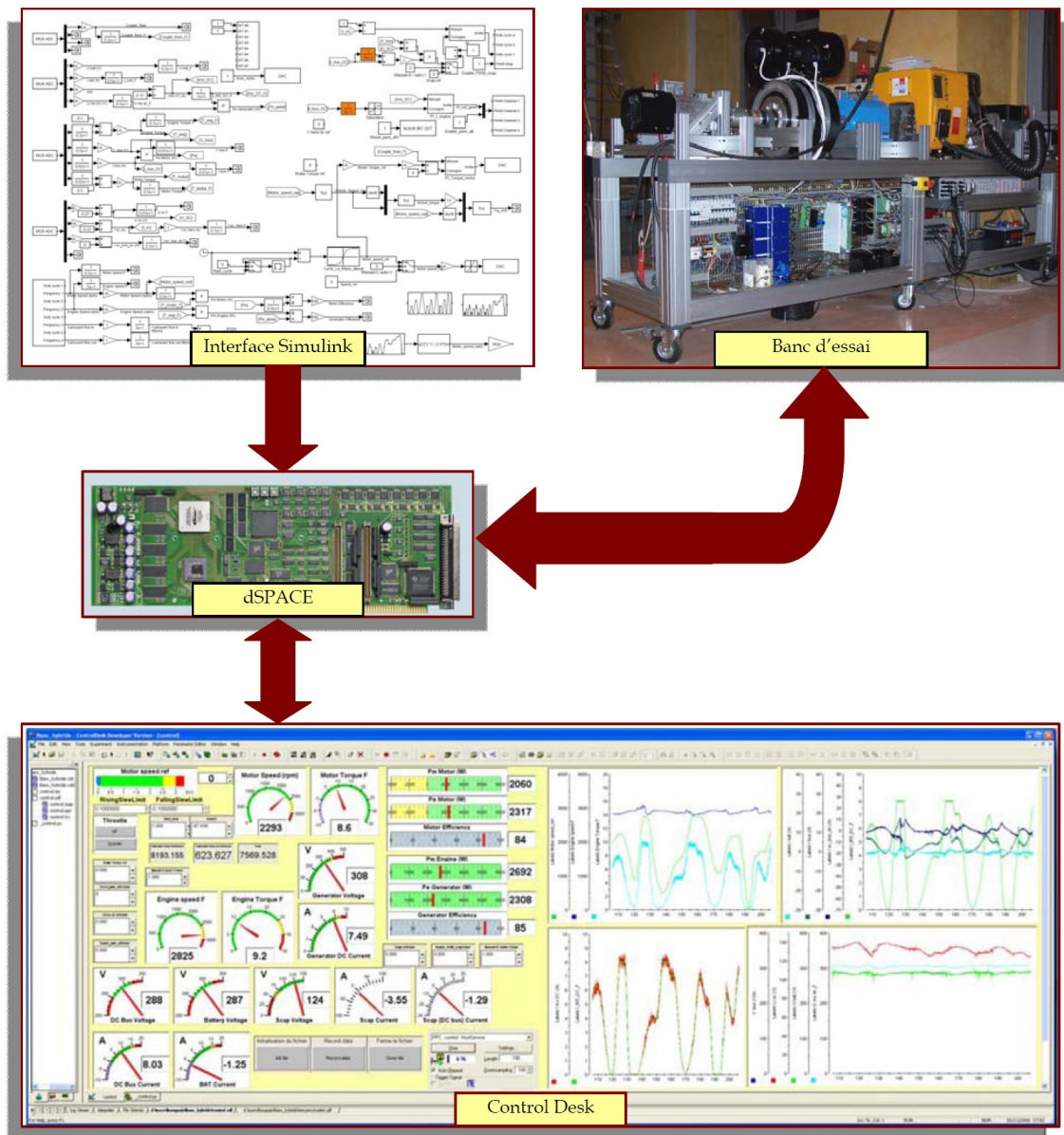


FIG. 55. Principe du prototypage rapide

## 2.4 CONCLUSION

Nous avons présenté et détaillé dans ce chapitre les deux équipements qui sont les supports techniques de nos travaux. Les deux bancs d'essais présentent des solutions originales pour l'étude de solution hybrides pour le transport terrestre. La multitude de configurations possibles fait que ces moyens d'essai pourront être exploités au-delà de cette thèse dans plusieurs travaux de recherche menés au sein du laboratoire.



## MODÉLISATION ET CARACTÉRISATION DES ÉLÉMENTS DES SYSTÈMES HYBRIDES

### 3.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre sont présentés les différents modèles utilisés dans nos travaux. Ils nous ont permis de simuler les différentes lois de gestion d'énergies qui ont été utilisées sur le fauteuil roulant électrique hybride ainsi que sur le banc d'essai hybride. Différentes méthodes de caractérisation et de modélisation ont été utilisées.

### 3.2 MODÈLE MÉCANIQUE DU VÉHICULE

Le modèle mécanique du véhicule doit permettre de calculer la puissance nécessaire pour propulser le véhicule en fonction de ses caractéristiques, de sa vitesse et de son accélération. Afin de calculer la puissance nécessaire à l'avancement du véhicule, on applique le principe fondamental de la dynamique (P.F.D.),

$$M \frac{d\vec{v}}{dt} = \Sigma \vec{F}_{\text{ext}}. \quad (3.1)$$

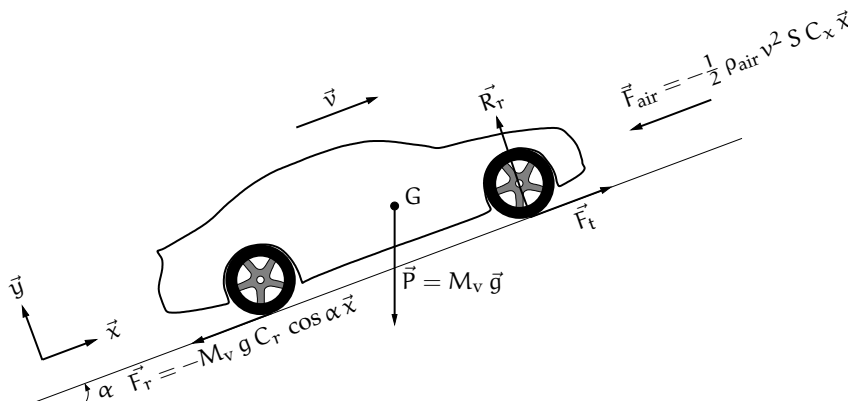


FIG. 56. Bilan des forces sur le véhicule

Le bilan des forces extérieures au véhicule est illustré par la figure 56. En appliquant le P.F.D (3.1) sur le véhicule,

$$M_v \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F}_{\text{air}} + \vec{P} + \vec{F}_r + \vec{F}_t + \vec{R}_r. \quad (3.2)$$

La force équivalente à la résistance de l'air  $\vec{F}_{\text{air}}$  sur le véhicule est donnée par l'équation suivante :

$$\vec{F}_{\text{air}} = -\frac{1}{2} \rho_{\text{air}} v^2 S C_x \vec{x}, \quad (3.3)$$

où  $v$  est la vitesse du véhicule (en m/s) et  $\rho_{\text{air}}$  la masse volumique de l'air ( $\rho_{\text{air}} = 1,3 \text{ kg/m}^3$ ). La surface frontale du véhicule  $S$  et le coefficient de pénétration dans l'air  $C_x$  sont des paramètres de construction du véhicule.

La résistance des roues sur le sol  $\vec{F}_r$  est donnée par la formule

$$\vec{F}_r = -P C_r \cos \alpha \vec{x}, \quad (3.4)$$

où  $P$  représente le poids du véhicule et  $\alpha$  l'angle formé par la route et l'horizontale. Le coefficient roulement  $C_r$  dépend du type et de la pression des pneumatiques.

D'après la figure 56 on peut voir que la composante de la force de traction  $\vec{F}_t$  suivant  $\vec{y}$  est nulle. On calcule donc  $|\vec{F}_t|$  en projetant  $\vec{F}_t$  sur l'axe porté par le vecteur  $\vec{x}$ ,

$$M_v \frac{dv}{dt} \vec{x} = \left( -\frac{1}{2} \rho_{\text{air}} v^2 S C_x - M_v g \sin \alpha - M_v g C_r \cos \alpha + F_t \right) \vec{x} \quad (3.5)$$

Donc, l'expression de la force de traction  $F_t$  mécanique est,

$$F_t = M_v \frac{dv}{dt} + \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} v^2 S C_x + M_v g \sin \alpha + M_v g C_r \cos \alpha \quad (3.6)$$

La puissance mécanique nécessaire à l'avancement du véhicule est égale au produit de la force de traction et de la vitesse,

$$P_m = F_t v. \quad (3.7)$$

Donc, d'après (3.6) et (3.7), l'expression de la puissance de traction du véhicule en fonction de la vitesse  $v$  et de l'accélération  $dv/dt$  est,

$$P_m = v \left( M_v \frac{dv}{dt} + \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} v^2 S C_x + M_v g \sin \alpha + M_v g C_r \cos \alpha \right). \quad (3.8)$$

### 3.3 MODÈLE DU MOTEUR THERMIQUE

Deux méthodes peuvent être utilisées pour caractériser et modéliser le moteur thermique :

- la méthode entièrement empirique qui consiste à cartographier le moteur suivant le couple et la vitesse sur l'arbre et la consommation sur les points de fonctionnement du moteur. Cette méthode présente l'avantage de ne nécessiter aucune connaissance *a priori* sur le fonctionnement du moteur et peut être utilisée efficacement dans le contrôle du système hybride ;



- la méthode semi-empirique qui consiste à établir un modèle dont certains paramètres seront à identifier par des tests expérimentaux. Cette méthode permet d’extrapoler les résultats pour des moteurs du même type mais de puissance différente. En faisant varier les paramètres du modèle (cylindrée, pression effective moyenne, course du piston, etc.), il est ainsi possible de faire un dimensionnement d’un moteur du même type adapté à l’application.

Dans cette partie, nous présentons un modèle semi-empirique du moteur diesel de 5 kW décrit dans le chapitre 2. Ce modèle a été présenté par Guzzella et Onder [18] et, plus succinctement dans la référence [19].

### 3.3.1 Variables normalisées

Quand un moteur est en régime permanent, on utilise généralement deux variables normalisées permettant de décrire son point de fonctionnement [13, 18, 19]. Ces deux variables sont la *vitesse moyenne du piston*

$$c_m = \frac{\omega_e S}{\pi} \quad (3.9)$$

et la *pression moyenne effective*

$$p_{me} = \frac{N \pi T_e}{V_d} \quad (3.10)$$

où  $\omega_e$  est la vitesse de rotation du moteur,  $T_e$  le couple du moteur,  $V_d$  la cylindrée du moteur, et  $S$  la course du piston. La paramètre  $N$  dépend du type de moteur : pour un moteur 4-temps,  $N = 4$  et pour un moteur 2-temps,  $N = 2$ .

La vitesse moyenne du piston  $c_m$  est la vitesse du piston moyennée sur un cycle. Les valeurs typiques pour  $c_m$  sont inférieures à 20 m/s [19]. Pour le moteur étudié,  $c_m = 6,5$  m/s.

La pression moyenne effective est la pression constante qui doit être appliquée au piston durant la course de combustion pour produire le même travail mécanique qu’un moteur à couple constant  $T_e$  produit pendant un cycle. Pour des moteurs à aspiration naturelle comme celui qui est sur la banc, la valeur maximale  $p_{me}$  est autour de  $10^6$  Pa (10 bar).

Pour une pression moyenne effective et une vitesse moyenne du piston fixe, l’équation

$$P_e = z \frac{\pi}{16} B^2 p_{me} c_m \quad (3.11)$$

décrit le lien entre la puissance produite par le moteur, le nombre de cylindres  $z$  et l’alésage du cylindre  $B$ .

Cette équation peut servir à estimer la taille du moteur nécessaire à une application donnée en connaissant la puissance maximale du moteur nécessaire.

Par exemple, pour l’application visée, une puissance d’environ 5 kW était nécessaire. Les paramètres du moteur d’après la documentation du constructeur sont les suivants :

- Course du piston :  $S = 65$  mm ;

- Nombre de cylindres :  $N = 1$  ;
- Cylindrée :  $V_d = 0,4131$  ;
- Alésage du cylindre :  $B = 90$  mm
- Nombre de cylindres :  $z = 1$ .

### 3.3.2 Efficacité du moteur

L'efficacité thermodynamique d'un moteur thermique est le rapport entre la puissance mécanique et le débit d'enthalpie de combustible  $P_c$  :

$$\eta_e = \frac{\omega_e T_e}{P_c} \quad (3.12)$$

où  $\omega_e$  est la vitesse de rotation du moteur (rad/s),  $T_e$ , le couple (Nm), et  $P_c$ , le débit d'enthalpie associé au débit massique de combustible  $\dot{m}_f$

$$\dot{m}_f = \frac{P_c}{H_l} \quad (3.13)$$

où  $H_l$  est le pouvoir calorifique inférieur du combustible.

L'efficacité du moteur  $\eta_e$  dépend principalement de la vitesse de rotation et du couple. L'efficacité du moteur sera donc définie de la façon suivante :

$$\eta_e = f(\omega_e, T_e) \quad (3.14)$$

Une approximation est généralement utilisée pour représenter la relation entre l'efficacité et le couple d'un moteur diesel. Il s'agit de l'approximation de Willans qui décrit de manière très simple la pression moyenne effective par [19]

$$p_{me} \approx e(\omega_e) \cdot p_{mf} - p_{me0}(\omega_e) \quad (3.15)$$

où la variable  $p_{mf}$  est la pression moyenne du combustible. Cette variable est la pression moyenne effective qu'un moteur d'une efficacité de 100 % produirait en brûlant une masse  $m_f$  de combustible avec un pouvoir calorifique (inférieur)  $H_l$

$$p_{mf} = \frac{H_l m_f}{V_d} \quad (3.16)$$

D'après cette définition, une autre expression de l'efficacité du moteur peut être obtenue :

$$\eta_e = \frac{p_{me}}{p_{mf}} \quad (3.17)$$

Le paramètre  $e(\omega_e)$  représente l'efficacité thermodynamique, c'est-à-dire, l'efficacité de la conversion de l'énergie chimique contenue dans le combustible en pression dans le cylindre. Le paramètre  $p_{me0}$  résume toutes les pertes mécaniques par frottements dans le moteur. Les deux paramètres  $e$  et  $p_{me0}$  dépendent principalement de la vitesse du moteur ; ils sont souvent approximés par des polynômes ou des fonctions splines. Pour des

modèles simples et en première approximation, ces paramètres peuvent être considérés comme constants.

Le paramètre  $e$  dans le modèle présenté ici est considéré comme constant; une formulation plus complète est donnée par Guzzella et Onder [18]. Le paramètre  $p_{me0}$  est décomposé en deux parties :

$$p_{me0} = p_{me0f} + p_{me0g} \quad (3.18)$$

où  $p_{me0g}$  et  $p_{me0f}$  représentent respectivement la chute de pression des gaz entre l'admission et l'échappement du moteur (considéré constante ici) et les frottements.

Les frottements dans le moteur sont modélisés par une fonction proposée par Patton et Nitschke [26] :

$$p_{me0f} = k_1(\theta_e) \cdot (k_2 + k_3 \cdot S^2 \cdot \omega_e) \cdot \Pi_{e,max} \cdot \sqrt{\frac{k_4}{B}} \quad (3.19)$$

Les valeurs typiques des paramètres de l'équation (3.19) pour un moteur diesel sont données dans le tableau 16. La variable  $\Pi_{e,max}$  est le rapport maximal de suralimentation pour lequel le moteur est conçu pour fonctionner à basse vitesse,  $B$  est l'alésage du cylindre et  $S$  la course du piston. La dépendance  $k_1(\theta_e)$  à la température ( $\theta_e$ ) est considérée en régime permanent, c'est-à-dire  $k_1 = \text{constante} = k_1(\theta_\infty)$ .

SI	
$k_1(\theta_\infty)$	$1,44 \cdot 10^5$ (Pa)
$k_2$	0,46 (-)
$k_3$	$9,1 \cdot 10^{-4}$ (s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
$k_4$	0,075 (m)

TAB. 16. Valeurs du modèle de friction pour un moteur diesel [18]

La représentation simplifiée (qui ne contient pas la gestion des limites) du modèle du moteur thermique est donnée par la figure 57.

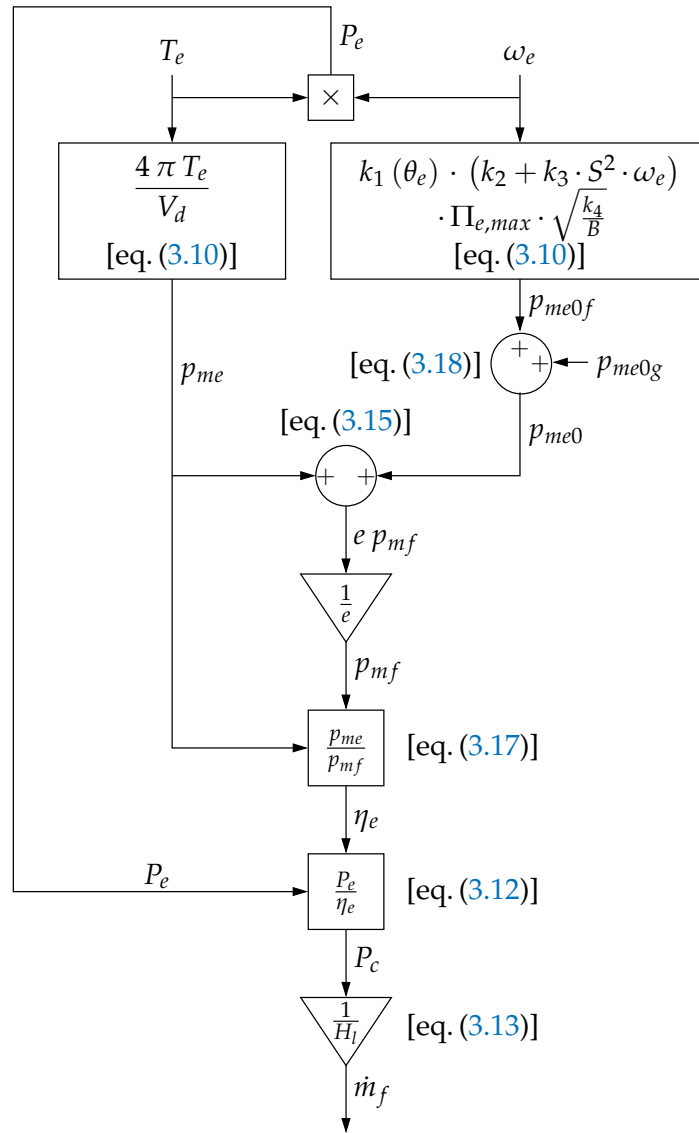


FIG. 57. Représentation du modèle du moteur thermique

## 3.4 CARACTÉRISATION DU MOTEUR THERMIQUE

La mesure du débit du moteur thermique étant défailante, il a été nécessaire de valider le modèle à partir de la documentation constructeur qui donne les valeurs de la consommation du moteur seulement à couple maximal. La comparaison entre les valeurs données par le constructeur et le modèle est donnée sur la figure 58. Le modèle étant relativement simple, il subsiste encore des erreurs entre le modèle et les valeurs expérimentales.

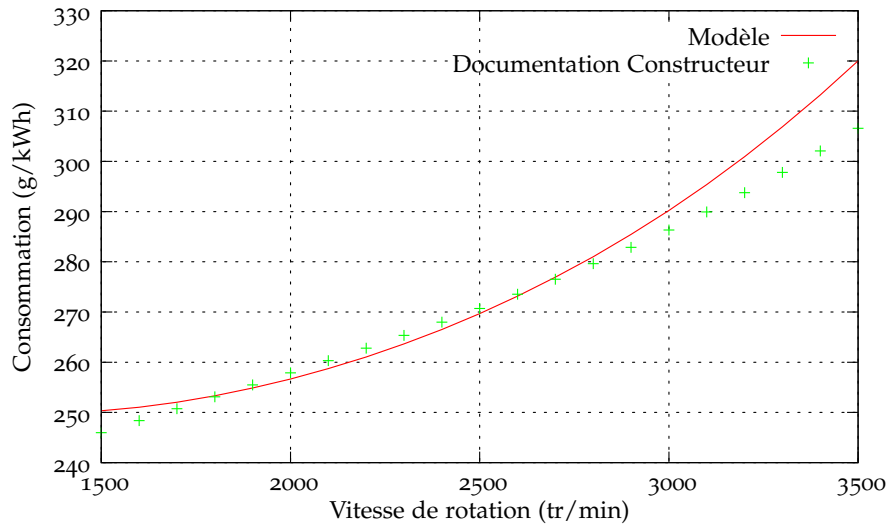


FIG. 58. Comparaison entre la documentation constructeur et le modèle de la consommation du moteur à couple maximal

La cartographie des courbes d'iso-rendements est donnée sur la figure 59. Cette cartographie prends en compte les limites du moteur données par le constructeur dans le plan vitesse-couple.

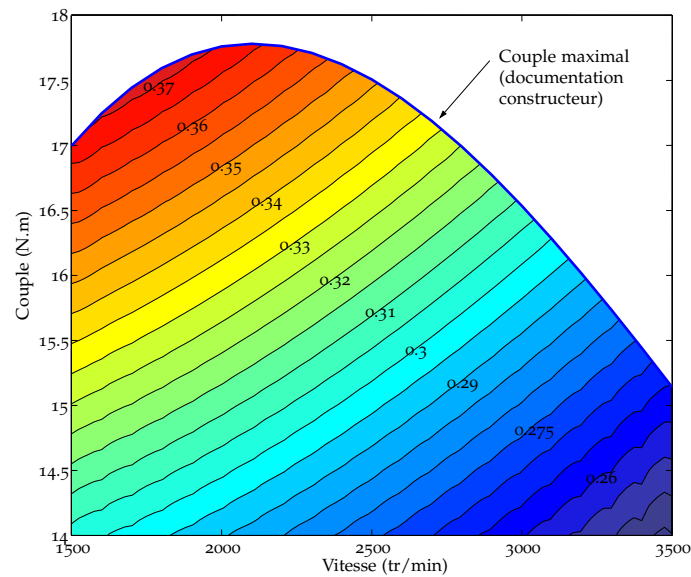


FIG. 59. Courbes d'iso-rendement du moteur thermique

### 3.5 MODÉLISATION DU PACK DE SUPERCONDENSATEURS

#### 3.5.1 Schéma équivalent électrique

Un supercondensateur peut être modélisé par les schémas donnés par la figure 60. Dans le modèle de la figure 60(a), on distingue plusieurs parties :

LA BRANCHE PRINCIPALE qui est représentée par la résistance  $r_1$  et les condensateurs  $C_0$  et  $C_v$ . Elle détermine l'évolution de l'énergie pendant les cycles de charge et décharge. La valeur  $C_v$  varie en fonction de la tension présente à ses bornes :  $C_v = k_v \cdot V_0$  ;

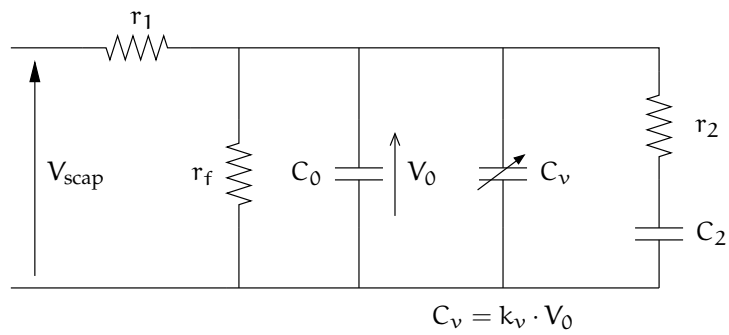
LA BRANCHE LENTE qui est représentée par la résistance  $r_2$  et le condensateur  $C_2$ . Elle intervient lors du phénomène de redistribution des charges internes du composant intervenant à la fin de charge ou de la décharge ;

LA RÉSISTANCE  $r_f$  qui est la résistance de fuite du composant. Elle est de l'ordre de quelques kilo-ohms.

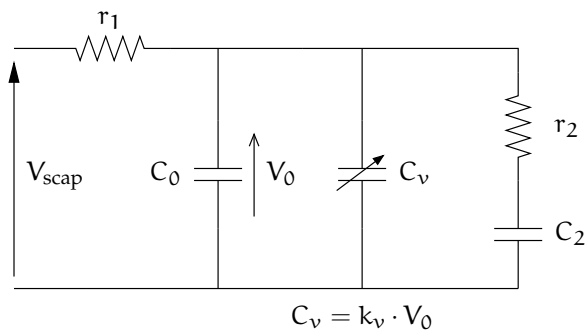
Pour l'application visée, la résistance de fuite  $r_f$  (auto-décharge sur un temps relativement long) est négligées. Le modèle équivalent retenu est donc celui donné par la figure 60(b).

#### 3.5.2 Identification des paramètres du circuit équivalent

La méthode d'identification graphique des éléments du circuit équivalent de la figure 60(b) est présentée sur la figure 61. Il y a 5 éléments à identifier : la résistance série  $r_1$ , la capacité



(a) Modèle complet



(b) Modèle simplifié

FIG. 60. Modèles équivalents d'un supercondensateur

$C_0$ , le coefficient  $k_v$ , la résistance  $r_2$  et la capacité  $C_2$ . Les deux éléments ( $r_2$ ,  $C_2$ ) peuvent, dans certains cas, être négligés.

Nous avons choisi d'appliquer la méthode de détermination pour une cellule à l'ensemble de notre pack : un pack de supercondensateur est donc équivalent à un seul supercondensateur dont la tension est d'autant plus élevée qu'il y a de composants en série.

Afin de déterminer les paramètres, il est nécessaire de procéder à une charge à courant constant du supercondensateur depuis sa tension nulle. La méthode présentée par Belhachemi [4] est la suivante : les paramètres de la branche principale ( $r_1$ ,  $C_0$  et  $k_v$ ) sont identifiés à partir de la réponse en tension du composant lors d'une charge à courant constant. La figure 61 montre l'évolution du courant et de la tension du pack de supercondensateurs lors d'une charge à un courant constant de 49 ampères.

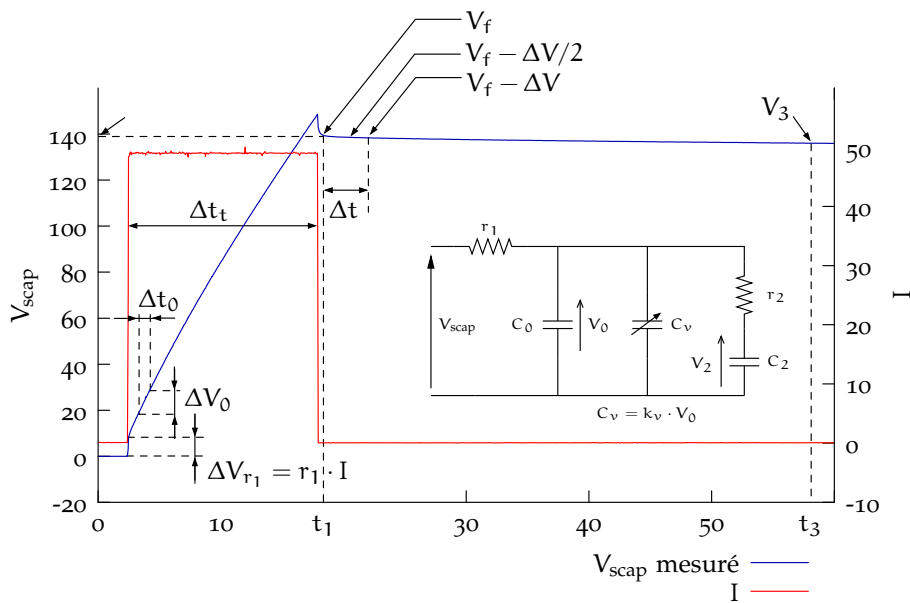


FIG. 61. Identification graphique des éléments du schéma équivalent pour un échelon de 49 ampères

*Identification de  $r_1$*

La résistance  $r_1$  est déterminée à partir de l'échelon de tension  $\Delta V_{r_1}$  engendré par la présence de l'échelon de courant aux bornes de la résistance interne du pack de supercondensateurs. La valeur de  $r_1$  peut donc être simplement calculée à partir de la relation suivante :

$$r_1 = \frac{\Delta V_{r_1}}{I} \tag{3.20}$$

où  $I$  est l'amplitude de l'échelon de courant.



*Identification de  $C_0$* 

L'évolution temporelle de la tension  $v_1$  aux bornes de la capacité totale équivalente  $C_1 = C_0 + k_v V_0$  est donnée par la relation suivante :

$$\frac{dv_1}{dt} = \frac{I}{C_1(V_0)} \quad (3.21)$$

La capacité  $C_0$  est déterminée à partir de la pente initiale de l'évolution de la tension après le transitoire de courant. Nous avons la relation suivante :

$$C_0 = \frac{I}{\frac{\Delta V_0}{\Delta t_0}} \quad (3.22)$$

*Identification de  $k_v$* 

La charge totale stockée  $Q_t$  peut être obtenue à partir de deux relations :

$$Q_t = I \Delta t_t \quad (3.23)$$

et

$$Q_t = C_0 \Delta V_t + \frac{1}{2} k_v \Delta V_t \quad (3.24)$$

Nous pouvons en déduire l'expression de  $k_v$  :

$$k_v = \frac{2}{\Delta V_t^2} (I \Delta t_t - C_0 \Delta V_t) \quad (3.25)$$

*Identification de  $r_2$  et  $C_2$* 

Quand le supercondensateur est chargé et que le courant de charge s'annule, une redistribution des charges s'opère dans le composant. Ce phénomène est modélisé par un échange de charges de la branche principale vers la branche lente  $r_2, C_2$ . La résistance série interne  $r_1$  n'intervient pas dans cette phase.

La tension  $V_0$  aux bornes de  $C_0$  et donc également de  $(r_2, C_2)$  est égale à  $V_f$  en fin de charge (voir figure 61) :

$$V_0(t_1) = V_f. \quad (3.26)$$

La branche lente est supposée ne pas intervenir durant la charge (branche lente inactive [4]) ; la tension aux bornes de la capacité  $C_2$  est donc nulle :

$$V_2(t_1) = 0. \quad (3.27)$$

La valeur initiale  $i(t_1)$  du courant circulant de la branche principale vers la branche lente est donc,

$$i(t_1) = \frac{V_f}{r_2} \quad (3.28)$$

mais également,

$$i(t_1) = - \underbrace{(C_0 + k_v V_0(t_1))}_{C_1} \frac{dV_0}{dt}(t_1) \quad (3.29)$$

Pour le calcul de  $r_2$ , la pente initiale de  $V_0$ , c'est à dire  $\frac{dV_0}{dt}(t_1)$ , est approximée (cf. figure 61) de la façon suivante :

$$\frac{dV_0}{dt}(t_1) = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (3.30)$$

Le courant  $i(t_1)$  et  $V_0(t_1)$  sont calculés à partir de (3.28) au niveau médian de la tension  $V_f - \Delta V/2$  [4].

L'expression de  $r_2$  est déduite de (3.28) et (3.29) :

$$r_2 = \frac{V_f - \Delta V/2}{C_0 + k_v \underbrace{(V_f - \Delta V/2)}_{\approx V_0(t_1)}} \frac{\Delta t}{\Delta V} \quad (3.31)$$

La capacité  $C_2$  est calculée par rapport à la tension  $v_3$  en fin de redistribution des charges à  $t = t_3$ . Cette tension est généralement obtenue après quelques minutes. Quand la redistribution des charges est terminée, les tensions  $V_0$  et  $V_2$  aux bornes des capacités respectives  $C_0$  et  $C_2$  sont supposées égales :

$$V_0(t_3) \approx V_2(t_3) = V_3 \quad (3.32)$$

L'équation de conservation de la charge stockée permet d'établir l'expression de  $C_2$  en fonction de  $V_3$  et de  $Q_t$  calculé en (3.23) et (3.24) :

$$C_2 = \frac{Q_t}{V_3} - \left( C_0 + \frac{1}{2} k_v V_3 \right) \quad (3.33)$$

#### *Valeurs numériques des paramètres*

Pour valider le modèle, il suffit de comparer la réponse en tension simulée avec celle relevée lors de notre essai expérimental qui nous a permis de calculer les paramètres (figure 62(a)). Nous constatons que le modèle ne correspond pas tout à fait à l'expérience. En effet, ce modèle utilisé couramment dans le domaine du génie électrique est en général destiné aux cellules unitaires.

Dans notre cas, nous avons une mise en série de 10 packs de 15 volts ce qui représente 60 cellules en série. D'autre part, la détermination des paramètres, et notamment de  $C_0$ , est assez empirique. En effet, il n'y a pas de règle générale pour déterminer à priori la quantité  $\Delta V_0$ . Enfin, la variation même minime d'un des paramètres à une influence non négligeable sur la réponse en tension simulée.

De plus, les valeurs de  $r_2$  et  $C_2$  de la branche lente sont également difficile à identifier de manière graphique (la tension doit être stabilisée pour identifier la valeur  $V_3$  ce qui n'est pas le cas sur les tests de la figure 62(a)). Une première approximation permet d'obtenir les valeurs suivantes :

- $r_1 = 178 \text{ m}\Omega$
- $C_0 = 4,21 \text{ F}$
- $k_v = 0,0158$
- $r_2 = 133 \Omega$
- $C_2 = 13,8 \text{ F}$

Afin d'obtenir la meilleure modélisation comportementale possible, nous avons choisi d'utiliser une optimisation numérique des paramètres.

La méthode d'optimisation utilisée est la suivante :

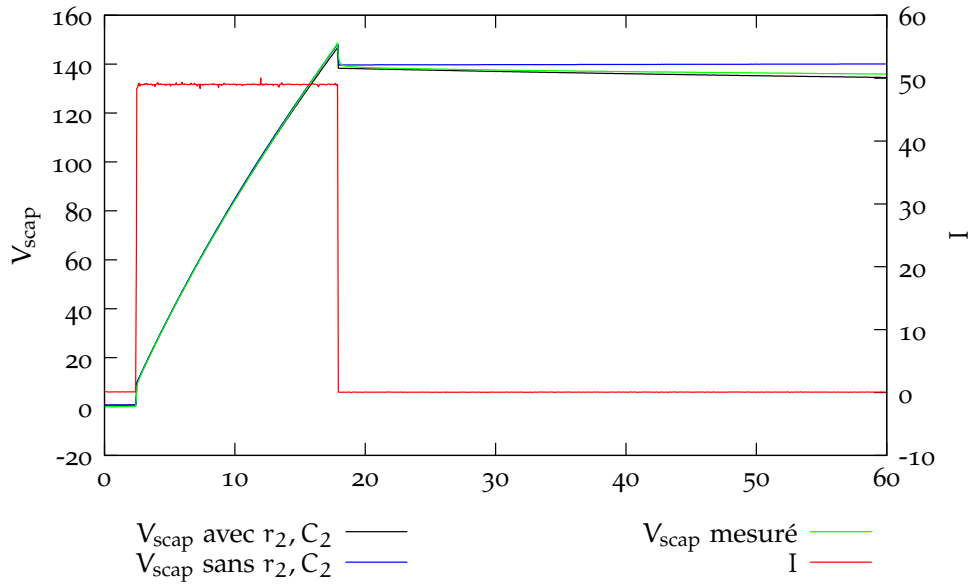
1. Les valeurs numériques des composants  $r_1$ ,  $C_0$ ,  $k_v$ ,  $r_2$  et  $C_2$  sont initialisées à la valeur obtenue avec la méthode graphique exposée précédemment. Ces valeurs sont normalement très proches de la solution ;
2. le modèle est simulé sur un profil expérimental pour le jeu de paramètres ( $r_1$ ,  $C_0$ ,  $k_v$ ,  $r_2$  et  $C_2$ ) initiaux et l'intégrale de l'erreur quadratique (IEQ) des tensions simulée et expérimentale est calculée. L'IEQ est la fonction à minimiser ;

Cette méthode a été appliquée avec l'algorithme du Simplex implémenté dans Simplotter : il s'agit d'un algorithme déterministe nécessitant une initialisation des paramètres, de préférence assez proche de la solution.

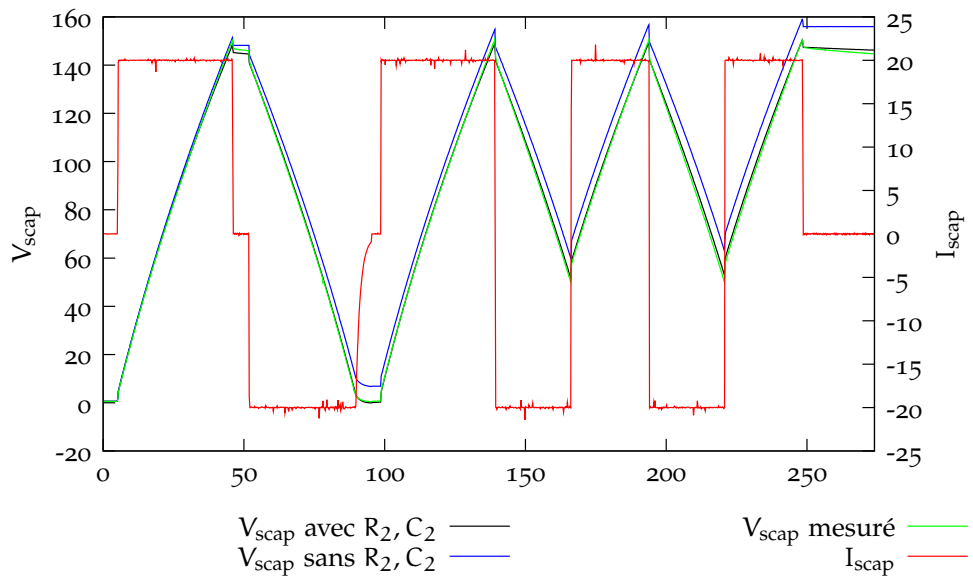
L'optimisation numérique a donné les paramètres suivants qui restent relativement proches de valeurs obtenues par la méthode graphique exceptée la valeur de  $C_2$  :

- $R_1 = 178 \text{ m}\Omega$
- $C_0 = 4,58 \text{ F}$
- $k_v = 0,017$
- $r_2 = 150 \Omega$
- $C_2 = 0,66 \text{ F}$

Si la branche lente est négligée, la recombinaison des charges en fin recharge ou de décharge des supercondensateurs est négligée. Dans ce cas, la tension aux bornes des supercondensateurs (tension initiale) est évaluée avec une erreur qui se propage le long du cycle. La figure 62 illustre le résultat de l'identification des paramètres avec et sans la branche lente ( $r_2$ ,  $C_2$ ) sur deux profils de charge et décharge.



(a)



(b)

FIG. 62. Comparaison entre le tension simulée et la tension expérimentale du banc de supercondensateurs

### 3.6 BATTERIES AU PLOMB-ACIDE

Le modèle de la batterie doit permettre de prédire l'autonomie du véhicule, c'est-à-dire permettre à chaque instant d'estimer l'énergie restante (état de charge SoC ou profondeur de décharge DoD) dans la batterie. Il n'est donc pas nécessaire d'établir un modèle dynamique (transitoire rapides) de la batterie.

Le modèle choisi est, par conséquent, un modèle équivalent électrique simple composé d'une capacité en série avec une résistance (résistance interne).

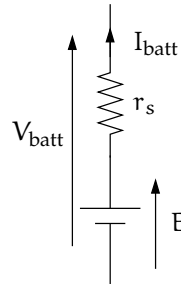


FIG. 63. Modèle équivalent électrique simple d'une batterie

#### 3.6.1 Tension en charge

La tension en charge est déduite directement à partir de la tension à vide et de la chute de tension due à la résistance interne série :

$$V_{\text{batt}} = E - r_s \cdot I_{\text{batt}} \quad (3.34)$$

où  $E$  est la tension à vide,  $r_s$ , la résistance série et  $I_{\text{batt}}$  le courant de la batterie.

#### 3.6.2 Tension à vide

Les batteries utilisées dans le système sont des batteries au plomb-acide : la tension à vide  $E$  est approximativement proportionnelle à l'état de charge de la batterie [21]. En considérant la variable DoD représentant la profondeur de décharge égale à zéro quand la batterie est complètement chargée et égale à un quand la batterie est vide, alors une formule simple, valide pour les batteries au plomb, donnant la tension à vide est [21],

$$E = n (2.15 - \text{DoD} \cdot (2.15 - 2.00)) \quad (3.35)$$

où  $n$  est le nombre de cellules composant la batterie.

#### 3.6.3 Capacité

La capacité d'une batterie est réduite si le courant est prélevé plus rapidement : prélever 1 ampère pendant 10 heures n'est pas équivalent à prélever 10 ampères pendant 1

heure.

Le modèle de Peukert présenté par Larminie et Lowry [21] permet de prendre en compte ce phénomène. Celui-ci n'est pas très précis pour des faibles courants mais à des courants élevés, le modèle de Peukert décrit le comportement de la batterie de manière très satisfaisante.

On définit la capacité de Peukert ( $C_p$ ),

$$C_p = I^k T \quad (3.36)$$

où  $k$  est une constante appelée coefficient de Peukert dont la valeur numérique est autour de 1,2 pour des batteries au plomb. La capacité de Peukert est équivalente à la capacité en ampère-heure d'une batterie qui est déchargée à un courant de 1 ampère.

Si la capacité de la batterie est donnée, par exemple, pour  $T = 10$  heures, la capacité de Peukert sera calculée de la manière suivante :

$$C_p = \underbrace{\left(\frac{C_{10}}{10}\right)^k}_I \cdot 10 \quad (3.37)$$

Si un courant  $I$  est débité par la batterie, alors, d'un point de vue de la capacité de la batterie, le courant débité est égale à  $I^k$ . Ainsi, la charge qui est prélevée réellement à la batterie  $C_R$  est la suivante :

$$C_R [\text{Ah}] = \int \frac{I^k}{3600} dt \quad (3.38)$$

La condition initiale de  $C_R$ , image de la profondeur de décharge initiale  $\text{DoD}_{\text{init}}$ , doit être donnée

$$C_{R,\text{init}} = C_p \cdot \text{DoD}_{\text{init}} \quad (3.39)$$

#### 3.6.4 Profondeur de décharge et état de charge

La profondeur de décharge d'une batterie est le rapport entre la charge prélevée et la capacité totale de la batterie :

$$\text{DoD} = \frac{C_R}{C_p} \quad (3.40)$$

La valeur de  $\text{DoD}$  est utilisée pour calculer la tension à vide (3.35) et la tension de la batterie.

L'état de charge  $\text{SoC}$  peut être déduit à partir de la profondeur de décharge de la batterie,

$$\text{SoC} = 1 - \text{DoD} \quad (3.41)$$

## 3.7 PILE À COMBUSTIBLE

### 3.7.1 *Modèle de la pile de 300 watts*

Généralement, une pile à combustible est hybridée avec une source auxiliaire d'énergie ou de puissance tels que des supercondensateurs ou des batteries. La source auxiliaire a pour rôle d'assurer les fortes dynamiques (pics de courant) permettant à la pile de fonctionner avec une dynamique relativement lente. Dans le mode de fonctionnement où la pile est hybridée avec une source auxiliaire de puissance, un modèle de pile statique peut être adopté : on considérera que le pile à combustible est toujours en régime permanent. Cette hypothèse a été validée expérimentalement et sera présentée dans le chapitre 4.

Sur la pile de 300 watts étudiée, les ventilateurs alimentent la pile avec un coefficient de rapport à la stœchiométrie (excès d'air) relativement haut assurant un fonctionnement où l'oxygène est toujours fournit en quantité nécessaire (pas de pertes par concentration) et l'eau produite à la cathode est évacuée (pas de noyage des électrodes).

Pour des piles de plus forte puissance, la caractéristique statique ne peut pas être utilisée pour prédire avec précision le comportement de la pile à combustible : le compresseur, la dynamique de l'air (pression de l'air dans les canaux cathodiques), le contenu d'eau de la membrane qui affecte sa résistance doivent être considérés. Un tel modèle a été développé au laboratoire et présenté par Blunier et Miraoui [6].

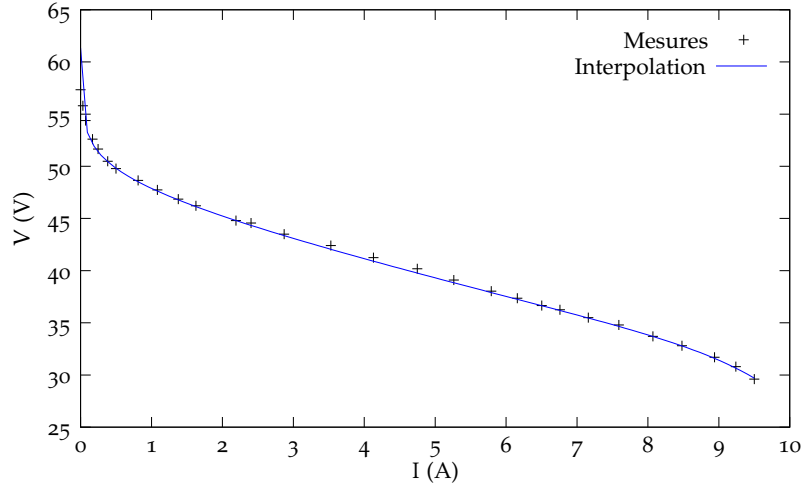
Une expression simple de la caractéristique statique de la pile est donc utilisée pour décrire la relation entre le courant  $I$  et la tension  $V$  du stack [5] :

$$V_{\text{stack}}(I) = E_0 - R I_{\text{stack}} - A \ln(I_{\text{stack}}) + m \exp(n I_{\text{stack}}) \quad (3.42)$$

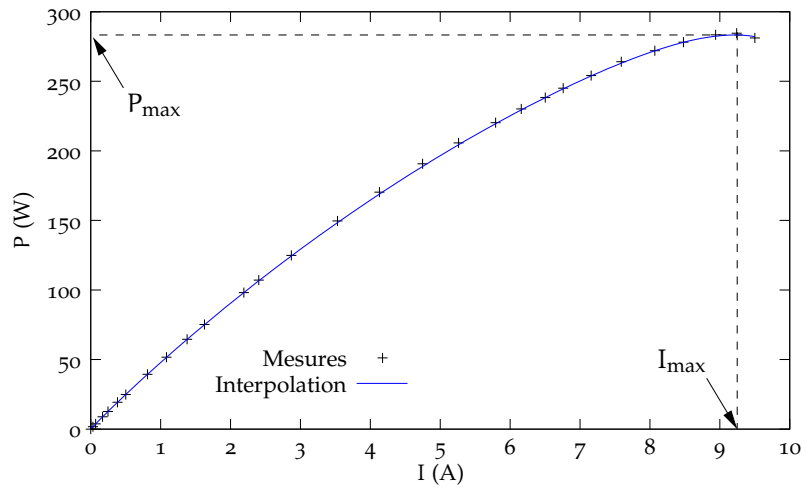
où  $E_0$ ,  $R$ ,  $A$ ,  $m$  et  $n$  sont des coefficients empiriques devant être déterminés expérimentalement.

### 3.7.2 *Caractérisation de la pile*

Un certain nombre d'essais ont été réalisés sur la pile à combustible afin de déterminer les paramètres empiriques du modèle présenté. Ces paramètres ont été identifiés à l'aide d'une régression non-linéaire (Levenberg-Marquardt). Les résultats sont présentés sur la figure 64 : la caractéristique donnée par (3.42) décrit relativement bien le comportement en régime permanent.



(a) Caractéristique  $V - I$  de la pile



(b) Caractéristique  $P - I$  de la pile

FIG. 64. Courbes de polarisation de la pile à combustible 300 W



### 3.8 MACHINES ÉLECTRIQUES ET CONVERTISSEURS ASSOCIÉS

Les machines électrique peuvent être modélisées à partir des équations physiques ou à partir des résultats expérimentaux permettant de prédire pendant le fonctionnement les points de fonctionnement de celles-ci.

L'approche proposée ici est l'approximation de Willans proposée par Guzzella et Sciarretta [19] dont l'expression est de la même forme que celle du modèle du moteur thermique,

$$P_{out} = e \cdot P_{in} - P_0 \quad (3.43)$$

où  $P_{out}$  est la puissance de sortie (puissance mécanique si il s'agit d'un moteur, puissance électrique s'il s'agit d'une génératrice),  $P_{in}$ , la puissance d'entrée (puissance mécanique s'il s'agit d'une génératrice, puissance électrique s'il s'agit d'un moteur). La puissance électrique inclut le convertisseur statique pour le moteur et la génératrice.  $P_0$  représente les pertes ayant lieu après la conversion d'énergie et  $e$  représente l'efficacité maximale — conversion électrique en mécanique s'il s'agit d'un moteur ou mécanique en électrique s'il s'agit d'une génératrice — qui peut être atteinte, c'est-à-dire quand  $P_0 = 0$ . L'efficacité totale de la machine  $\eta_m$  tient compte de  $P_0$ .

Ce modèle, bien que très simple, représente de façon relativement précise les différents point de fonctionnement de la machine et est valable qu'il s'agisse d'un moteur ou d'une génératrice. L'implémentation de cette simple équation linéaire dans un DSP est très aisée contrairement à une cartographie complexe utilisant des méthodes de linéarisation ou des fonctions splines. De plus, contrairement à beaucoup de modèles, avec ce modèle, le rendement du mode générateur n'est pas le miroir du rendement moteur.

Typiquement les valeurs de  $e$  et  $P_0$  dépendent de la vitesse de rotation  $\omega_m$ . Néanmoins, dans les modèles présentés ici, ces valeurs sont considérées constantes.

#### 3.8.1 Moteur de traction et convertisseur associé

L'identification des paramètres du moteur de traction a été réalisée en mesurant le couple ( $T_m$ ), la vitesse de rotation ( $\omega_m$ ) et la puissance électrique ( $P_e$ ) en amont du convertisseur statique. De cette façon, l'ensemble convertisseur-moteur est pris en compte.

Afin d'identifier  $e$  et  $P_0$ , il suffit de tracer la caractéristique  $P_m = f(P_e)$  et de trouver la courbe de tendance au moyen d'une régression linéaire. Les résultats sont présentés sur la figure 65.

La figure 66 présente les cartes de couples expérimental et du modèle en fonction de la puissance et de la vitesse de rotation. Nous pouvons remarquer une très bonne corrélation entre le modèle et les résultats expérimentaux.

La figure 67 présente les cartes de rendements expérimental et du modèle en fonction de la puissance et de la vitesse de rotation. Sur la carte expérimentale, dans les deux tiers des points de fonctionnement, le rendement de l'ensemble convertisseur moteur est satisfaisant ; il est réparti entre 70 et 87 % pour des puissances comprises entre 1 500 et 5 000 watts. Par contre, pour des puissances inférieures à de basses vitesses, les rendements sont mauvais.

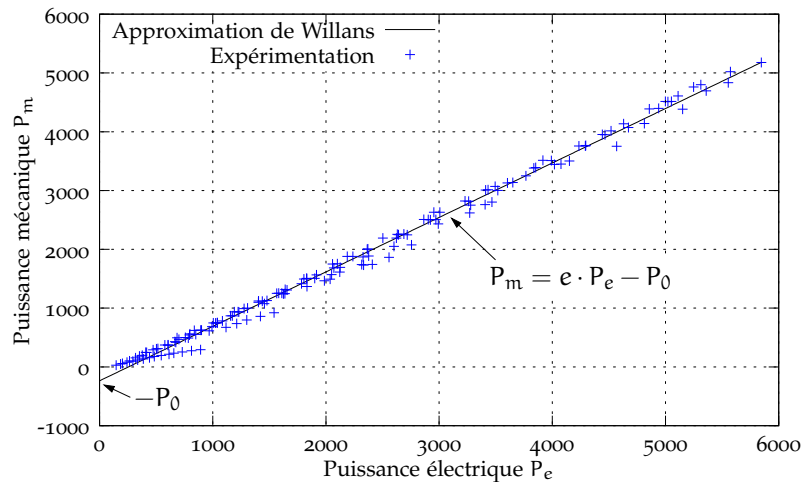


FIG. 65. Approximation de Willans du moteur d'entraînement et du convertisseur associé

Nous pouvons remarquer cependant que dans le modèle de Willans, le rendement dépend uniquement de la puissance mécanique : ceci est dû au fait que les paramètres  $e$  et  $P_0$  ont été considérés constants : afin d'avoir une dépendance du rendement par rapport à la vitesse de rotation comme dans les résultats expérimentaux, il est nécessaire d'établir un modèle plus complexe où  $e$  et  $P_0$  dépendent de la vitesse de rotation.

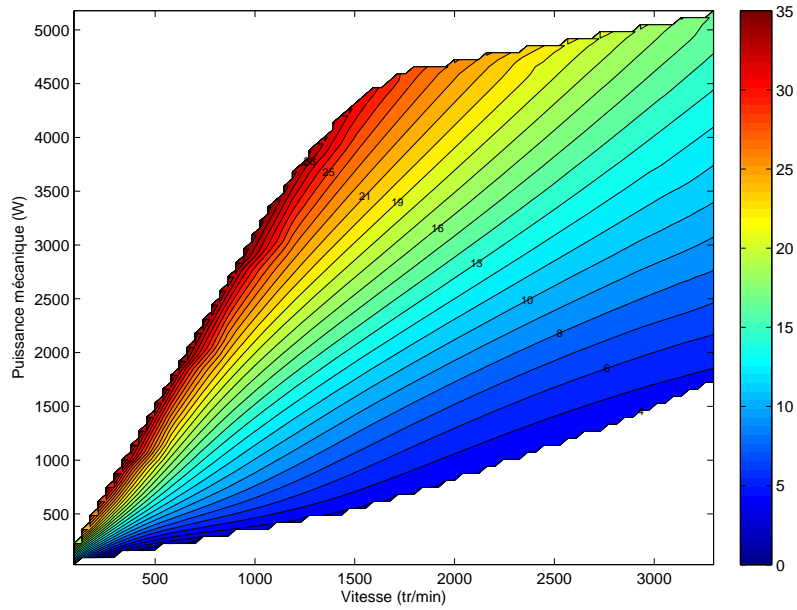
### 3.8.2 Génératrice et convertisseur associé

L'identification des paramètres de la génératrice a été réalisée de la même manière que la moteur électrique d'entraînement en mesurant le couple ( $T_m$ ), la vitesse de rotation ( $\omega_m$ ) et la puissance électrique ( $P_e$ ) sur le bus continu en aval du redresseur et du hacheur. De cette façon, l'ensemble convertisseurs-génératrice est pris en compte.

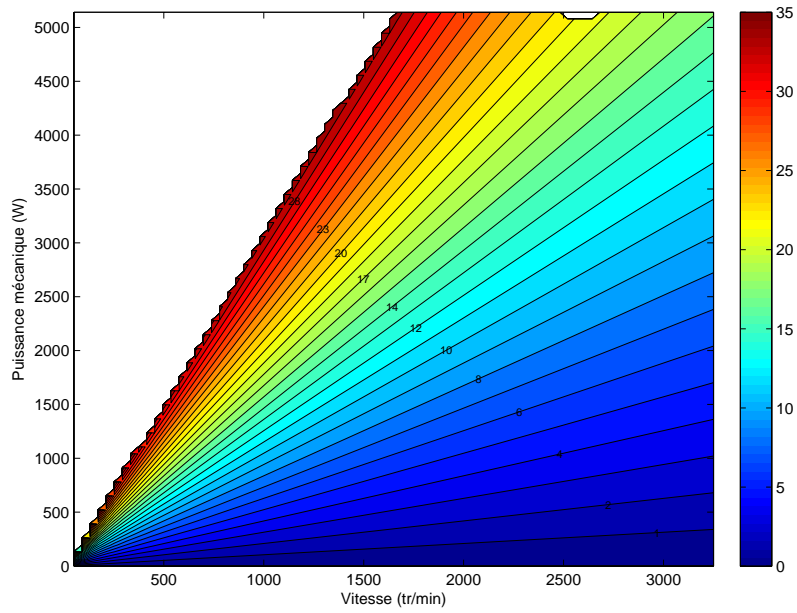
Afin d'identifier  $e$  et  $P_0$ , il suffit de tracer la caractéristique  $P_e = f(P_m)$  et de trouver la courbe de tendance au moyen d'une régression linéaire. Les résultats sont présentés sur la figure 68.

La figure 69 présente les cartes de couples expérimental et du modèle en fonction de la puissance et de la vitesse de rotation. Nous pouvons remarquer une très bonne corrélation entre le modèle et les résultats expérimentaux.

La figure 70 présente les cartes de rendements expérimental et du modèle en fonction de la puissance et de la vitesse de rotation. Nous pouvons faire la même remarque que pour le modèle du moteur d'entraînement, le rendement prédit avec l'approximation de Willans dépend uniquement de la puissance électrique : ceci est dû au fait que les paramètres  $e$  et  $P_0$  ont été considérés constants. Afin d'avoir une dépendance du rendement par rapport à la vitesse de rotation comme dans les résultats expérimentaux, il est nécessaire d'établir un modèle plus complexe où  $e$  et  $P_0$  dépendent de la vitesse de rotation.

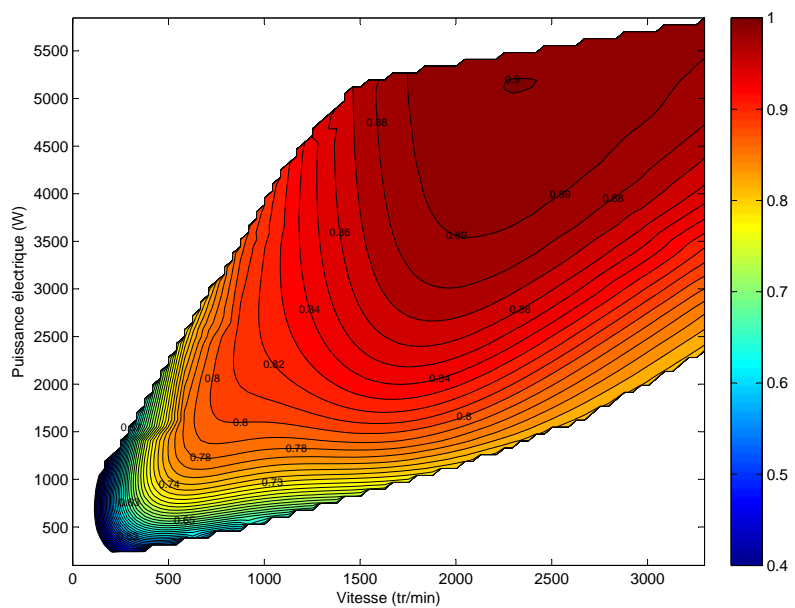


(a) Expérimentation

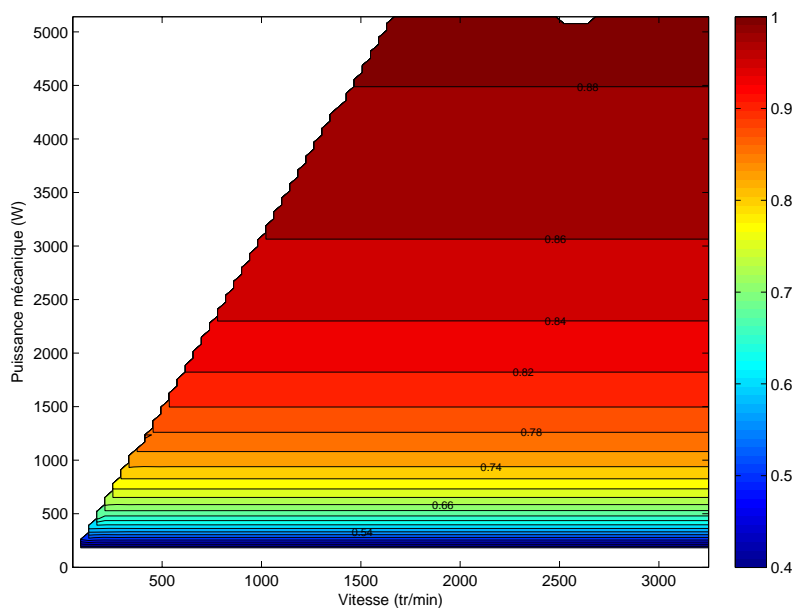


(b) Approximation de Willans

FIG. 66. Couple du moteur électrique d'entraînement en fonction de la puissance mécanique et de la vitesse de rotation



(a) Expérimentation



(b) Approximation de Willans

FIG. 67. Rendement du moteur électrique d'entraînement en fonction de la puissance mécanique et de la vitesse de rotation

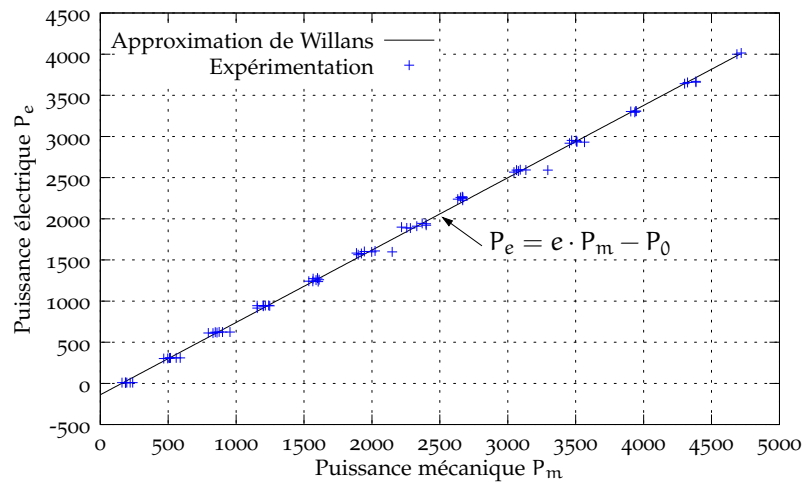
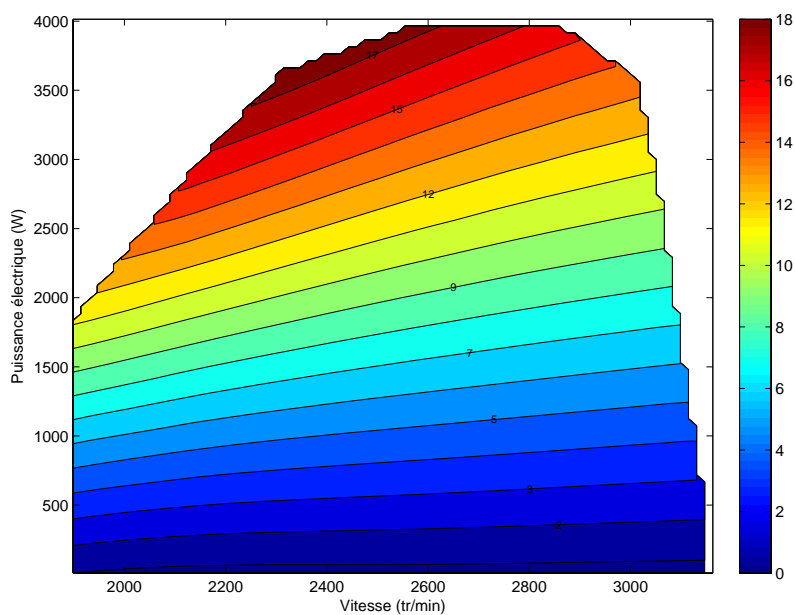
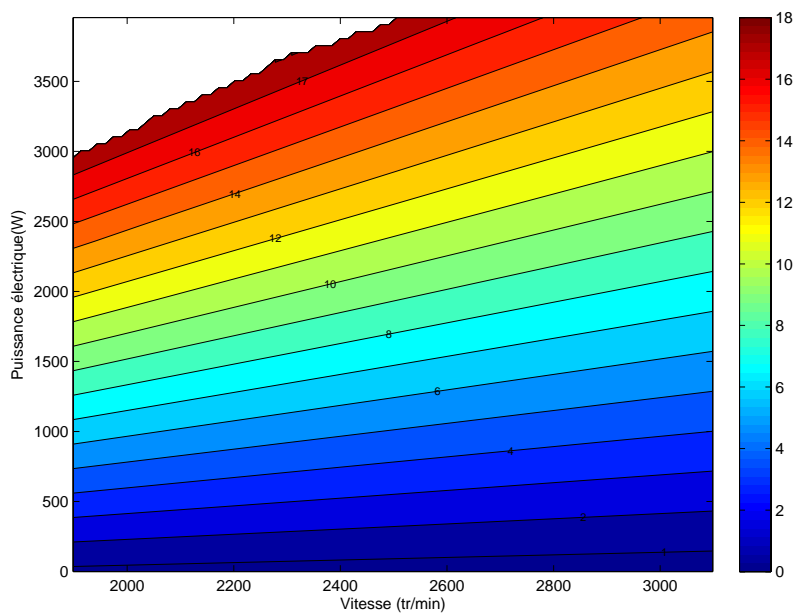


FIG. 68. Approximation de Willans de la génératrice et des convertisseurs associés

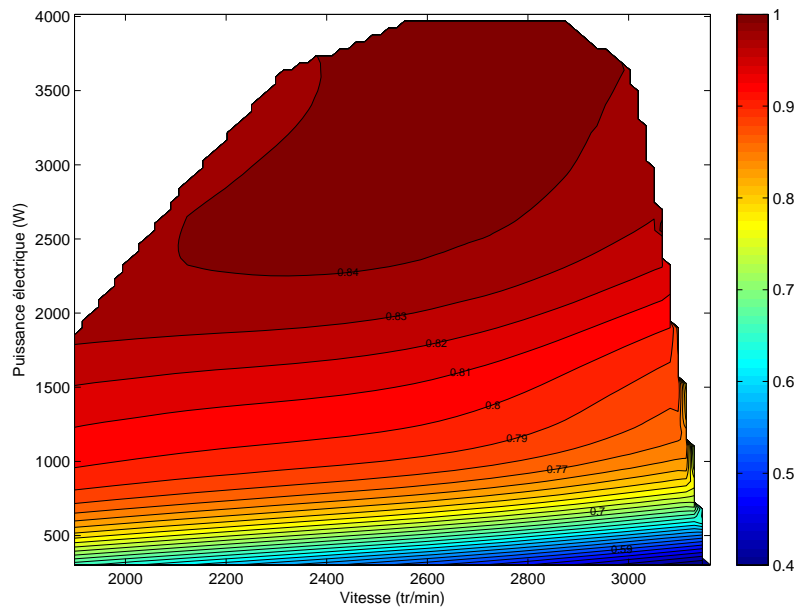


(a) Expérimentation

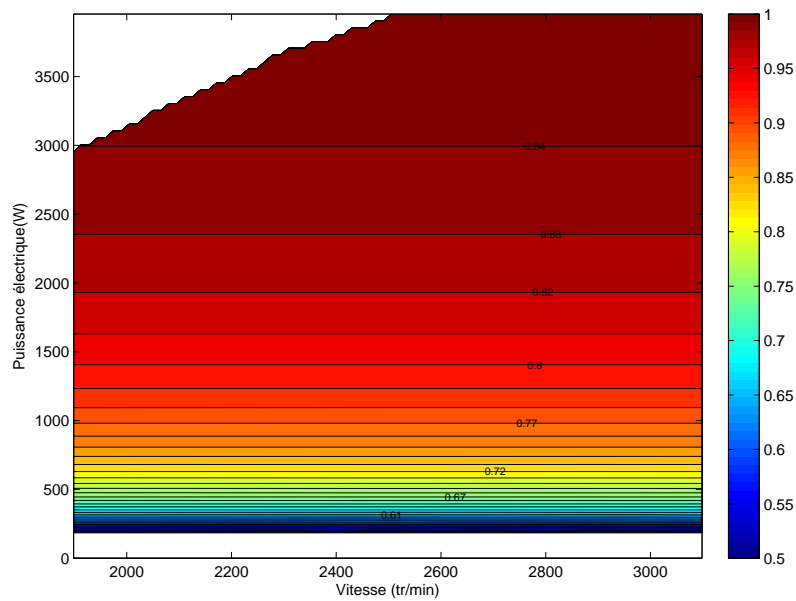


(b) Approximation de Willans

FIG. 69. Couple de la génératrice en fonction de la puissance électrique et de la vitesse de rotation



(a) Expérimentation



(b) Approximation de Willans

FIG. 70. Rendement de la génératrice électrique et des convertisseurs associés en fonction de la puissance électrique et de la vitesse de rotation

### 3.9 CHARGE MÉCANIQUE

Nous avons vu précédemment que la charge mécanique est constituée d'une inertie représentant la masse du véhicule et d'un ensemble de frein représentant le couple résistant à la roue. Nous avons inséré entre le moteur et la charge un capteur permettant de mesurer le couple et la vitesse exercés par le moteur électrique de traction. La consigne de couple à donner au frein provient de l'équation issue du principe fondamental de la dynamique qui est calculée en temps réel dans le système de prototypage. Pour pouvoir réguler ce couple de freinage, nous avons ajouté un second capteur de couple mesurant uniquement l'effort exercé par les freins (figure 71). Ceci permet donc de s'affranchir du couple transitoire exercé par la charge inertielle.

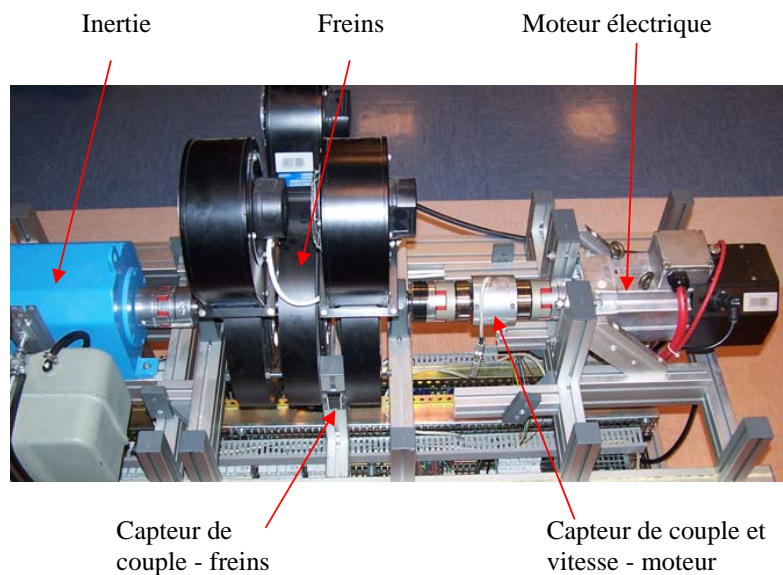


FIG. 71. Capteurs de couple de la charge mécanique

Néanmoins il faut aussi prendre en compte les différents couples de frottement présents sur le banc (frottement accouplements, paliers de guidage de l'axe des freins...). Nous avons donc déterminé expérimentalement ces frottements en comparant simplement pour plusieurs vitesses le couple de freinage mesuré et le couple moteur. Les mesures ont montré que la relation qui liait le couple de frottement de la ligne d'arbre est proportionnelle au couple de freinage et indépendante de la vitesse. Il peut donc être très facilement pris en compte dans la stratégie de contrôle.



## EXPÉRIMENTATION DE CHAÎNES DE TRACTIONS HYBRIDES

## 4.1 FAUTEUIL ROULANT ÉLECTRIQUE HYBRIDE PILE À COMBUSTIBLE ET BATTERIE

## 4.1.1 Contrôle

*Système pile à combustible.*

Un des objectifs de l'étude était de pouvoir contrôler le système pile à combustible de façon simple mais robuste. La stratégie de contrôle retenue est présentée sur la figure 72.

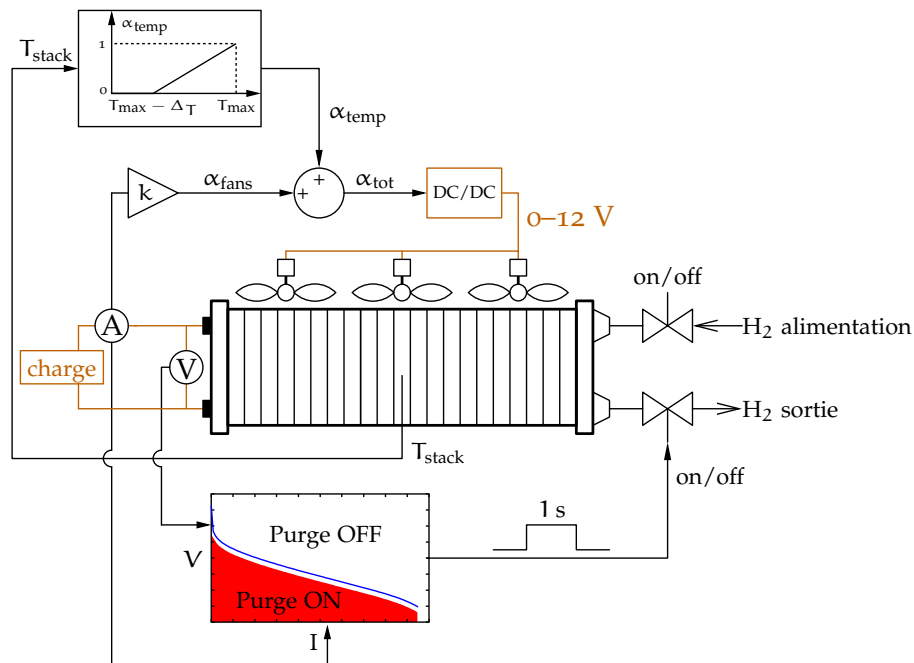


FIG. 72. Stratégie de contrôle de la pile à combustible

- Le débit d'oxygène nécessaire au fonctionnement de la pile doit être asservi en fonction du courant débité. Le contrôle des ventilateurs se fait à l'aide d'un simple hacheur. Ici nous avons choisi de faire varier le rapport cyclique du convertisseur  $\alpha_{fans}$  proportionnellement au courant débité par la pile.
- Côté hydrogène, la pile fonctionne en mode « dead end » ; c'est-à-dire qu'elle consomme uniquement l'hydrogène nécessaire en fonction du courant débité. La sortie anode est fermée par une électrovanne de purge.

- La température de la pile doit être maintenue en dessous d’une valeur maximale qui est de 50 °C dans notre cas. Néanmoins, une température élevée permet d’augmenter la tension. Il faut donc maintenir la température la plus élevée possible mais sans dépasser la valeur maximale. Lorsque la température de la pile approche la limite fixée ( $T_{max} - \Delta T$ ), la référence de vitesse (rapport cyclique  $\alpha_{temp}$ ) qui proportionnelle à la température de la pile est ajoutée à la référence de vitesse des ventilateurs ( $\alpha_{fans}$ ).
- En mode « dead end », il apparait une accumulation d’eau et d’azote à l’anode ; ceci a pour effet de faire chuter la tension de la pile en dessous de sa valeur normale (donnée par la courbe de polarisation). Il est donc nécessaire d’évacuer l’eau et l’azote pour retrouver une tension correcte en ouvrant la vanne de purge pendant un court instant. Pour déterminer l’instant de purge, nous comparons, pour un courant donné, la tension théorique donnée par la courbe de polarisation à la tension mesurée. Si la tension est trop basse (par exemple 10% en dessous de la courbe de polarisation), la vanne de purge est ouverte pendant une seconde.

*Contrôle du système global*

L’objectif du contrôle du système est de faire débiter à la pile à combustible un courant défini prenant en compte la dynamique des moteurs de traction tout en respectant les contraintes imposées par le cœur de pile. Dans notre cas, la pile est utilisée comme prolongateur d’autonomie (range extender) et ne nécessite donc pas un temps de réponse très rapide. De plus les variations rapides de courant ne sont pas très bien tolérées par les piles à combustible (risque d’assèchement ou de noyage des membranes). Lorsqu’une variation de charge apparait sur le bus continu, la pile conserve son point de fonctionnement précédent et c’est la batterie qui assure le complément de puissance. La pile quant à elle va atteindre la nouvelle consigne de charge progressivement. Dans le cas d’une variation de courant positive sur le bus continu, la batterie fournit le complément de courant nécessaire et dans le cas d’une variation négative (freinage récupératif par exemple) la batterie est rechargée par la pile à combustible.

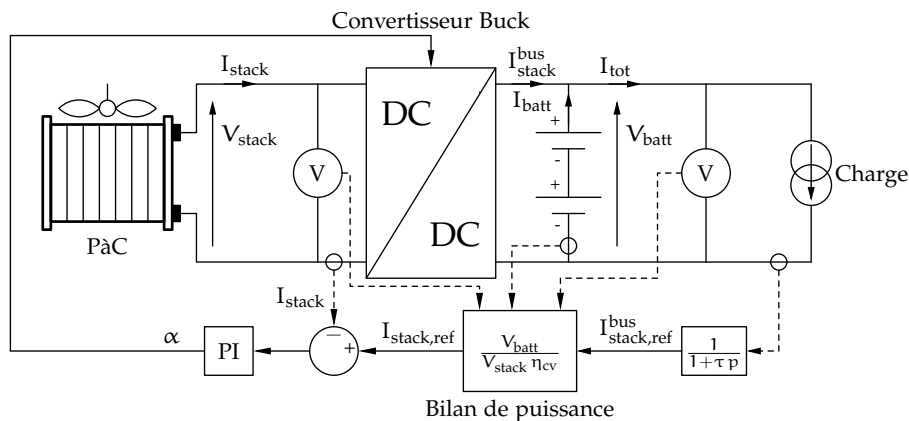


FIG. 73. Stratégie de contrôle du système global

Le temps de réponse de la pile dépend bien entendu de la stratégie de contrôle choisie.

Dans notre cas le courant du bus continu ( $I_{load}$ ) est conditionné à l'aide d'un filtre passe-bas du premier ordre comme le montre la figure 73.

La sortie du filtre est la référence de courant de la pile à combustible côté bus continu ( $I_{stack}^{bus}$ ). On déduit le courant de référence de la pile  $I_{stack}$  en utilisant le gain du convertisseur DC/DC :

$$V_{stack} I_{stack} \eta_{CV} = V_{batt} I_{stack}^{bus} \quad (4.1)$$

où  $\eta_{CV}$  est le rendement du convertisseur. Le courant  $I_{stack}$  est bien sûr limité au courant maximal que peut fournir la pile à combustible. Au delà de cette valeur, la batterie fournira automatiquement le complément de courant nécessaire.

#### 4.1.2 Simulations et résultats expérimentaux

##### *Tests de la pile à combustible et identification des paramètres*

Les tests dynamiques (figure 74) montrent que la courbe de polarisation peut-être utilisée pour estimer en temps réel avec une précision correcte la tension du cœur de pile à partir du courant mesuré. Comme nous l'avons précisé précédemment, l'estimation de la tension de la pile est nécessaire pour pouvoir détecter une éventuelle chute de tension due à l'accumulation d'azote ou d'eau à l'anode. Si une plus grande précision était demandée, nous pourrions prendre en compte l'effet de la température pour calculer les paramètres de la courbe de polarisation comme le montrent Blunier et Miraoui [7] et Laurencelle *et al.* [22].

##### *Tests de la batterie et identification des paramètres*

Dans le but de valider et d'identifier les paramètres du modèle de la batterie (voir chapitre 3), nous imposons le même profil de courant au modèle et à la batterie réelle. Les tensions simulée et mesurée sont comparées pour des paramètres donnés.

L'intégrale de l'erreur quadratique est calculée. Les paramètres optimisés sont ceux qui donnent la plus petite erreur. Ils ont été déterminés à l'aide d'un algorithme d'optimisation Simplex. La figure 75 montre le comparatif entre les résultats de simulation avec les paramètres optimisés et la tension mesurée sur la batterie réelle.

##### *Tests du système global*

Les expérimentations ont été réalisées sur le banc de test spécifique présenté dans le chapitre 2.

Le profil de courant utilisé pour les tests a été enregistré sur un fauteuil roulant réel pendant une mission typique de 520 secondes. Ce profil sera « rejoué » grâce à une charge active électronique. Plusieurs tests ont été réalisés pour ce même profil de courant avec quatre constantes de temps  $\tau$  du filtre passe-bas différentes (figure 76). En ajustant la valeur de  $\tau$ , on modifie le temps de réponse de la pile à combustible : plus elle est élevée, plus la dynamique est faible.

Les mesures des courants du convertisseur de la pile à combustible, de la batterie et de la charge sur le bus continu pour  $\tau = 2$  secondes sont présentées sur la figure 78.

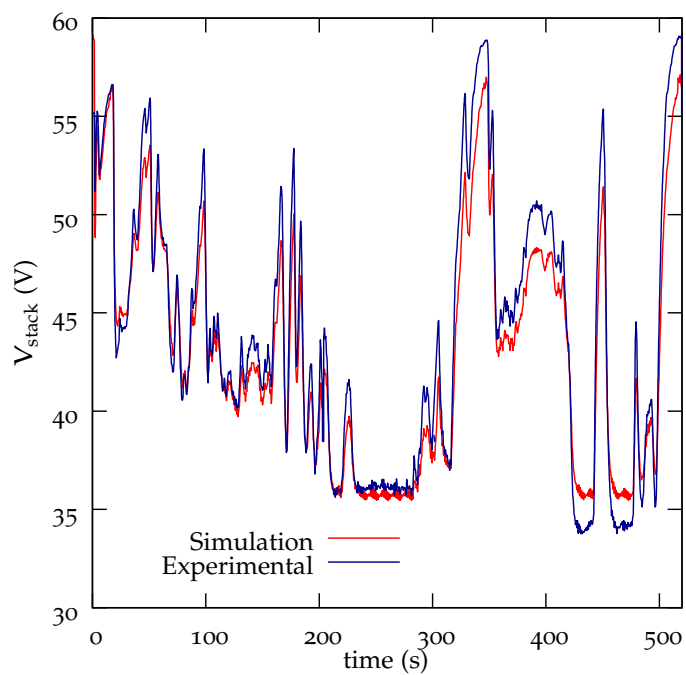


FIG. 74. Comparaison de la tension pile mesurée et calculée sur un cycle

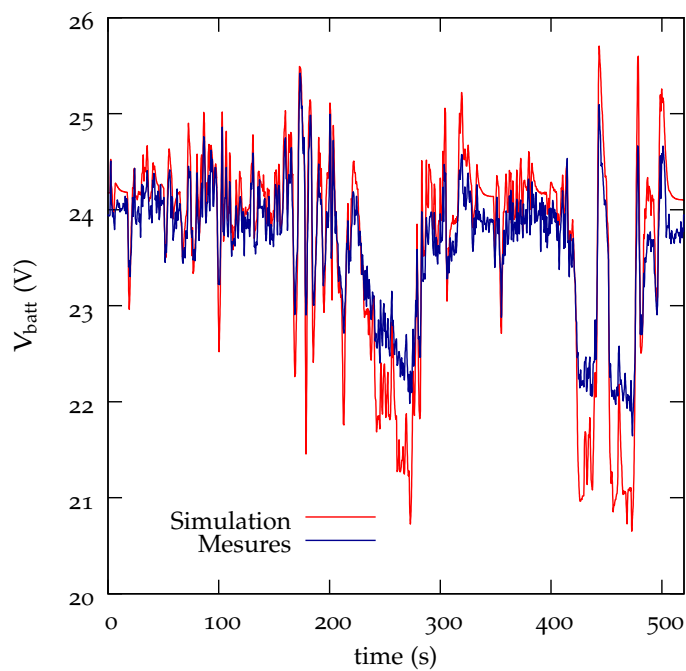
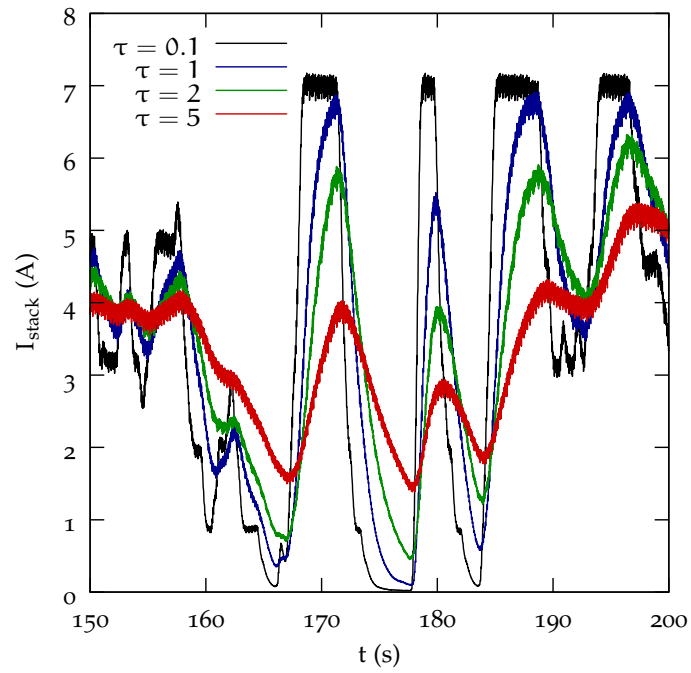
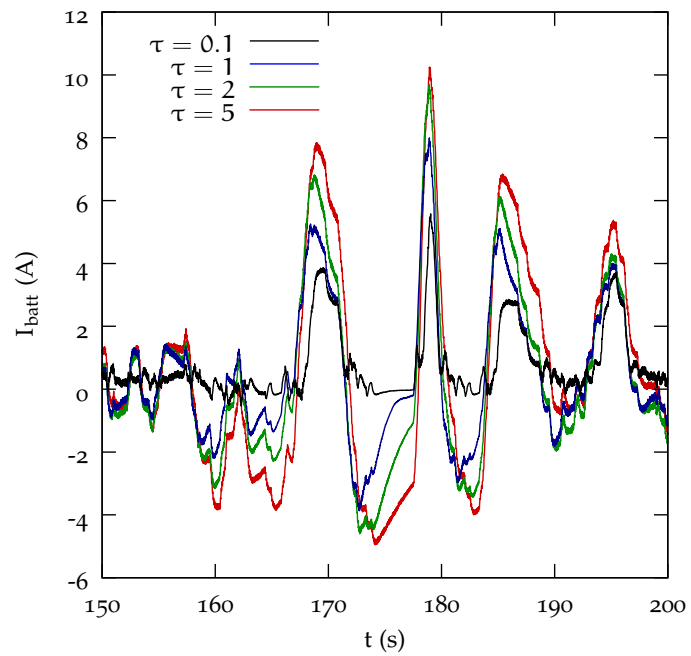


FIG. 75. Comparaison de la tension batterie mesurée et simulée sur un cycle

FIG. 76. Courants de la pile à combustible pour différentes valeurs de  $\tau$ FIG. 77. Courants de la batterie pour différentes valeurs de  $\tau$

Nous pouvons remarquer que le courant délivré par la pile à combustible est lissé, que la batterie délivre ou absorbe bien les courants transitoires et que la batterie fournit le complément de courant lorsque la pile est à sa pleine puissance (phénomène observable vers 250 secondes).

Le contrôle de la température fonctionne correctement (figure 79). En effet la température  $T_{\text{stack}}$  est maintenue la plus élevée possible sans jamais dépasser la température maximale  $T_{\text{max}}$  : lorsque la température est plus élevée que  $T_{\text{max}} - \Delta T$ , la vitesse des ventilateurs est augmentée proportionnellement en fonction de  $T_{\text{stack}}$  afin de ne pas dépasser  $T_{\text{max}}$ . Lorsqu'il n'est pas nécessaire de refroidir la pile, la vitesse des ventilateurs est uniquement asservie en fonction du courant débité par la pile à combustible.

L'estimation de la tension de la pile à combustible permet de gérer les purges. La figure 80 montre que lorsque la tension mesurée chute en dessous de 90% de la tension calculée (aux environs des 421 secondes), une purge est déclenchée pendant une seconde. Nous constatons que suite à cette purge, la tension mesurée de la pile retrouve une valeur correcte.

#### 4.1.3 Conclusion

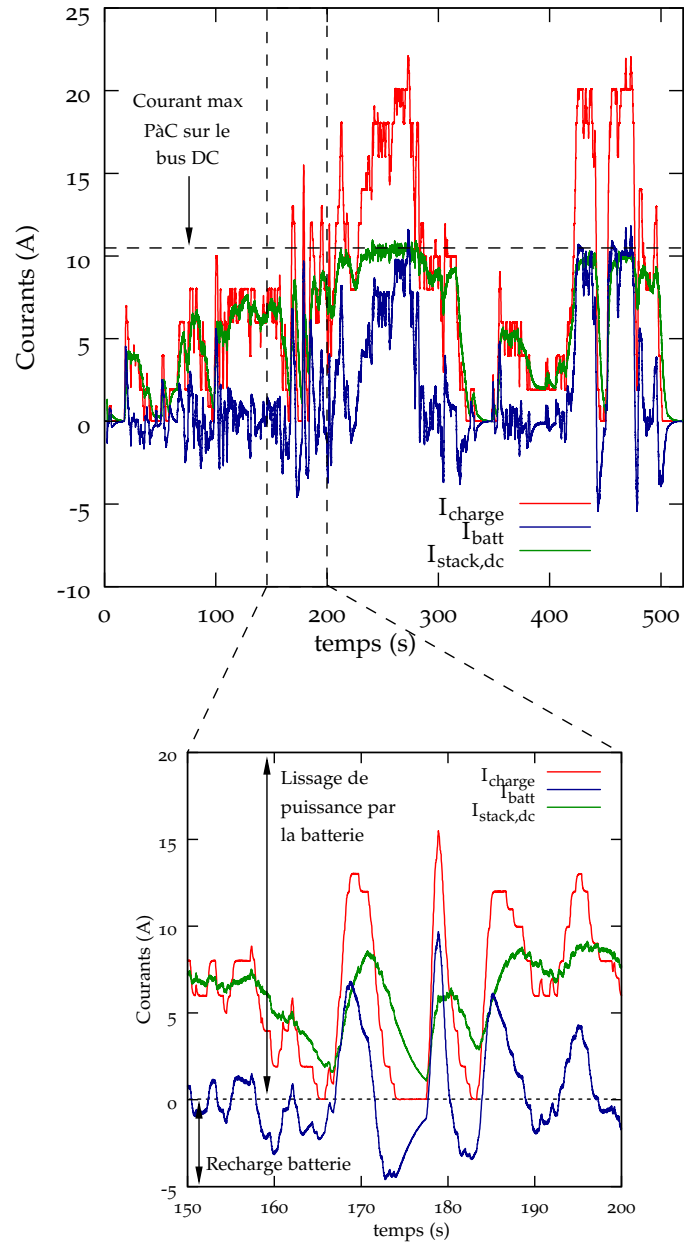
Nous avons présenté ici la simulation et l'expérimentation d'un fauteuil roulant électrique hybride pile à combustible/batterie. Le contrôle de la pile à combustible et la gestion du système complet ont été présentés et validés expérimentalement. Les résultats des tests ont montré qu'une stratégie de contrôle simple et robuste peut donner de très bons résultats.

Le système étudié met en évidence les avantages de l'hybridation d'une pile à combustible avec des batteries. En effet, la pile à combustible, qui est le composant le plus onéreux du système, peut être dimensionnée uniquement pour fournir la puissance moyenne d'un cycle donné et non la puissance maximale qui est en générale atteinte uniquement lors de phases transitoires (accélérations par exemple). Lorsque la puissance maximale est demandée, la batterie fournit le complément de puissance nécessaire.

De plus, nous avons voulu montrer que, dans cette gamme de puissance, les avantages en termes de compacité d'un système pile à combustible à pression atmosphérique sont assez intéressants. Si nous prenons en compte la masse et le volume du réservoir d'hydrogène ainsi que ceux de la pile à combustible, nous obtenons une énergie spécifique d'environ 80 Wh/kg soit deux fois plus qu'une batterie au plomb (figure 81).

Par contre, concernant la densité d'énergie, nous avons 103 Wh/l ce qui est équivalent à une batterie au plomb. Si nous comparons maintenant notre système pile à combustible à une batterie Li-ion, les résultats sont en faveur de la batterie : énergie spécifique comprise entre 100 et 200 Wh/kg pour une densité d'énergie comprise entre 200 et 400 Wh/l (figure 81).

Enfin, si nous prenons en compte le rendement « du puits à la roue », nous pouvons constater que le rendement de la batterie Li-ion est au moins trois fois supérieur à celui de la pile à combustible lorsque l'hydrogène est produit à partir de l'électrolyse de l'eau.

FIG. 78. Courants sur le bus continu pour  $\tau = 2$  s

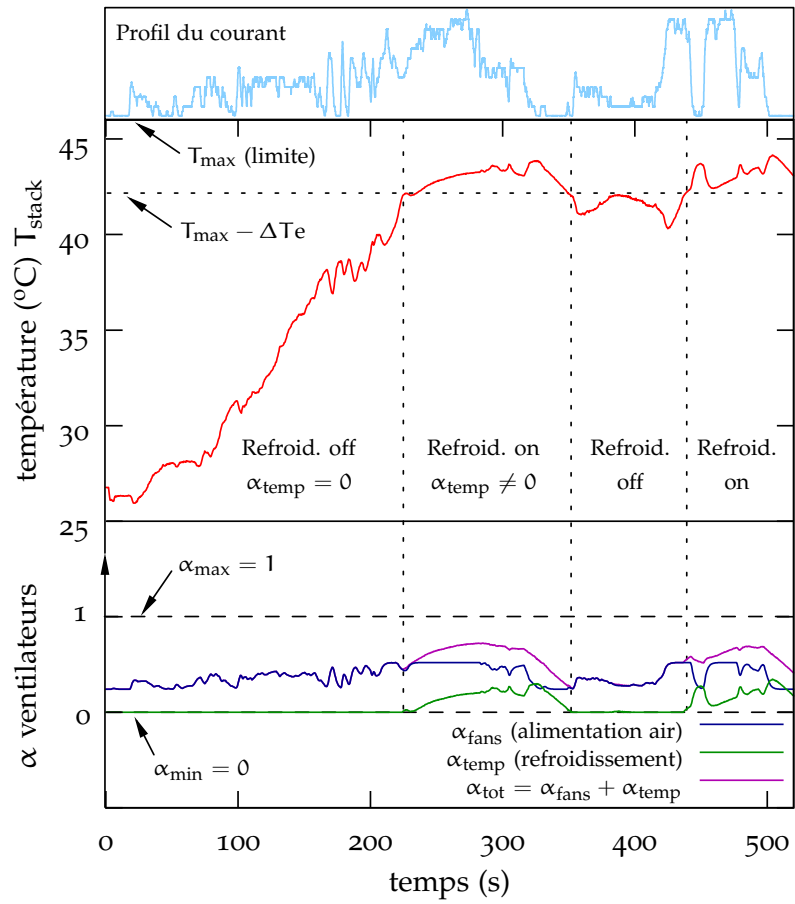


FIG. 79. Gestion de la température



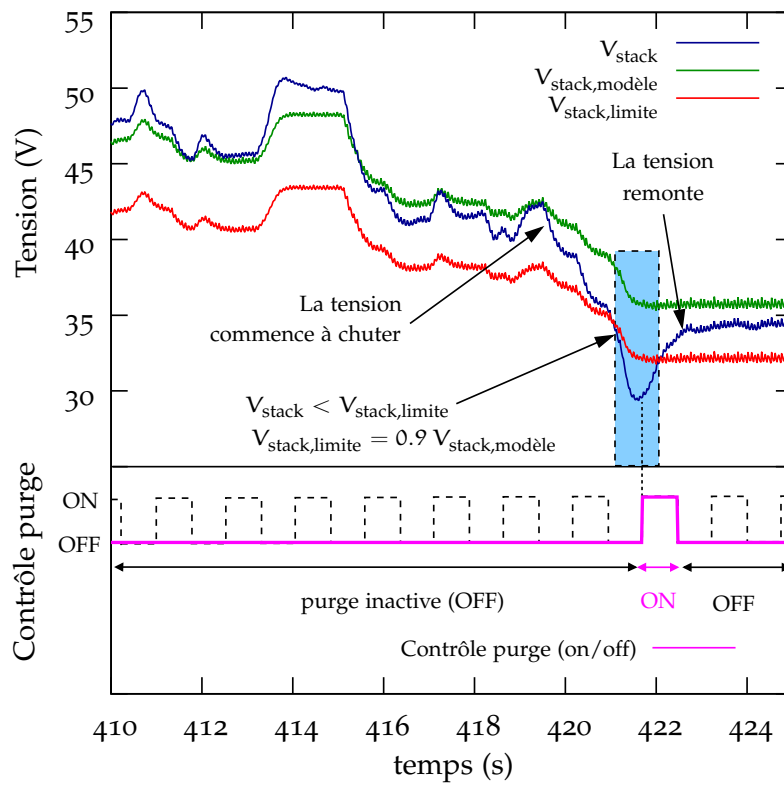


FIG. 80. Gestion des purges

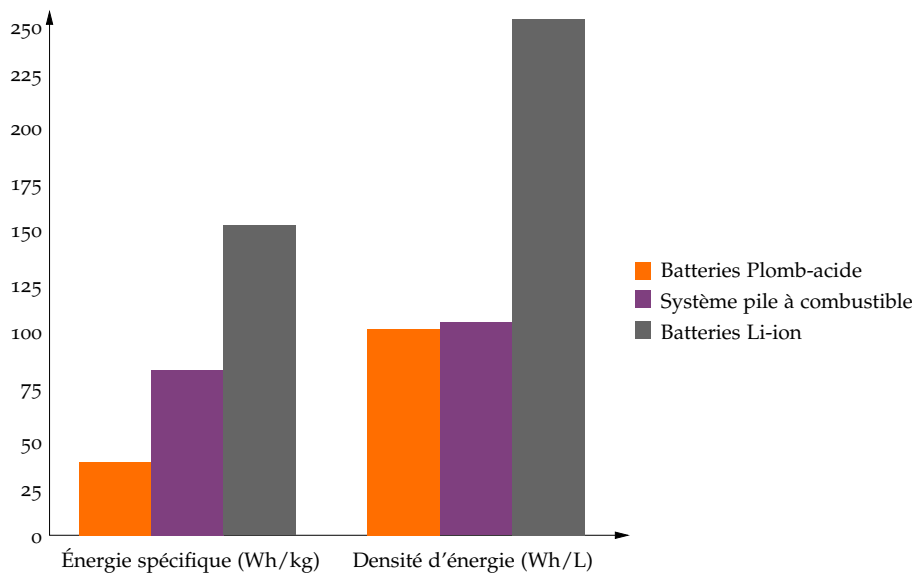


FIG. 81. Comparaison des énergies spécifiques et densités d'énergies entre batteries et la pile à combustible étudiée

## 4.2 BANC D'ESSAI HYBRIDE

Grâce à l'outil de prototypage rapide, il est possible de tester et valider immédiatement différentes architectures hybrides ainsi que différentes stratégies de contrôle. De plus, nous pouvons utiliser les caractéristiques comportementales des différents éléments du banc afin d'optimiser la gestion d'énergie : par exemple déterminer la vitesse de rotation optimale du moteur diesel garantissant la plus faible consommation de carburant pour une puissance à fournir donnée.

### 4.2.1 Association batteries et supercondensateurs

Nous avons choisi dans un premier temps de tester l'association batterie et supercondensateurs. On peut considérer ce montage comme étant une solution hybride tout électrique. L'objectif de cette expérimentation est de montrer l'intérêt d'utiliser des supercondensateurs dans le cas où de fortes pointes de puissances transitoires sont demandées à la source par la charge.

#### Cycles accélération et décélération

Nous avons imposé ici un profil de vitesse donné à la charge constituée du frein et de l'inertie. Dans ce cas précis, le frein ne sera pas alimenté ; seul subsistera donc le couple résistant de la ligne d'arbre (frottement des paliers et couple de freinage rémanent du frein). Le profil est décomposé en plusieurs phases d'accélération et de décélération avec différents paliers de vitesses (1 100, 2 200 et 3 300 tr/min). On peut constater que les accélérations et décélérations sont de plus en plus raides au fur et à mesure de l'évolution du cycle (figure 82).

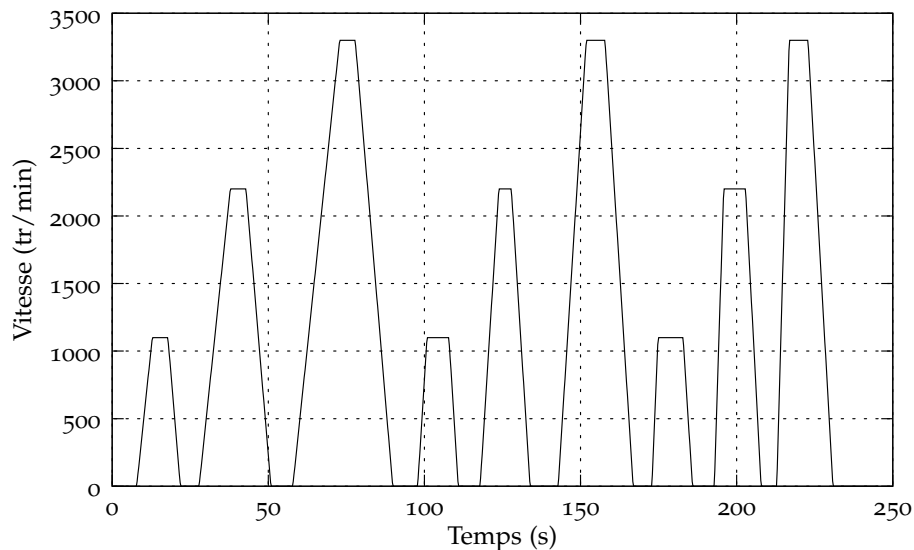


FIG. 82. Cycle de référence

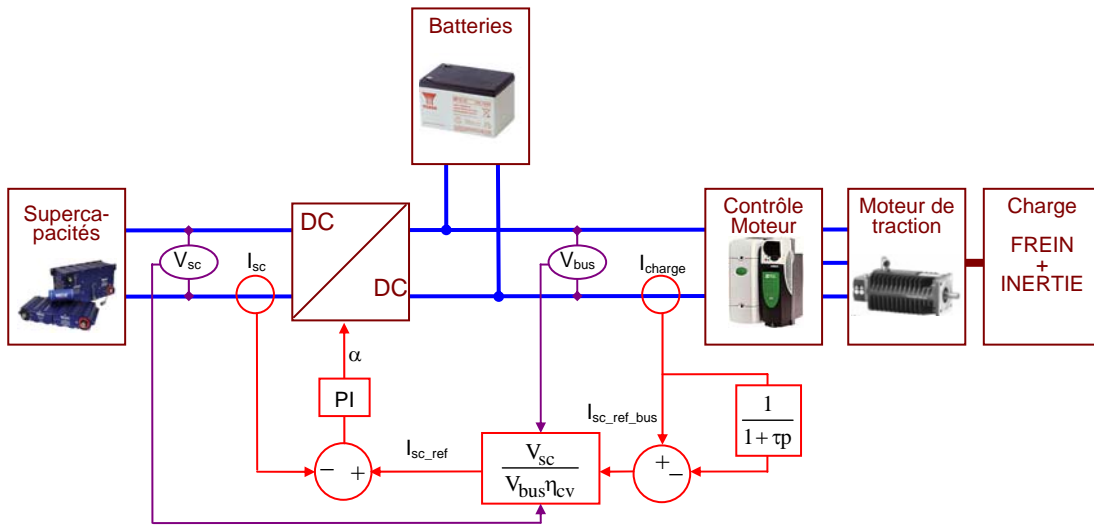


FIG. 83. Contrôle des supercondensateurs

La loi de contrôle des supercondensateurs utilisée dans cette expérimentation est basique. On détermine le courant de consigne des supercondensateurs ( $I_{sc\_ref\_bus}$ ) vu du côté bus continu du convertisseur des supercondensateurs en retranchant la valeur de la mesure de courant consommé par le convertisseur du moteur de traction ( $I_{charge}$ ) sur le bus continu à la même valeur mais atténuée par un filtrage du premier ordre (figure 83). La constante de temps ( $\tau$ ) de la fonction de transfert sera ajustée à plusieurs valeurs afin de bien mettre en évidence son action sur le système. Il faut prendre ensuite en compte le gain en courant engendré par le convertisseur de puissance ainsi que son rendement en prenant garde au signe du courant suivant si on est en fonctionnement abaisseur ou élévateur.

Nous avons réalisé les mesures pour différentes valeurs de constante de temps du filtre : 1.5, 3 et 6 secondes. Au début de chaque cycle, les supercondensateurs sont chargés à leur tension maximale. Les figure 84 et 85 montrent l'évolution des courants de la batterie pour les différentes constantes de temps. On remarque très rapidement que les transitoires de courant de la batterie sont lissés par l'action des supercondensateurs. Plus la constante de temps du filtre ( $\tau$ ) est élevée, plus le courant de la batterie est lissé. Les oscillations de courant présentent lors des phases de freinage sont dues au convertisseur du moteur de traction et sont donc indépendantes de notre contrôle.

La figure 86 illustre la variation de tension du pack de supercondensateurs. On peut mettre en évidence les phases de récupération d'énergie dans lesquelles les composants sont rechargés.

Nous pouvons remarquer sur la figure 87 l'évolution du courant dans le pack de supercondensateurs pour les différentes constantes de temps. Ces relevés montrent ici pleinement l'intérêt de ce type de composant qui est de fournir ou absorber des pointes de courants importantes.

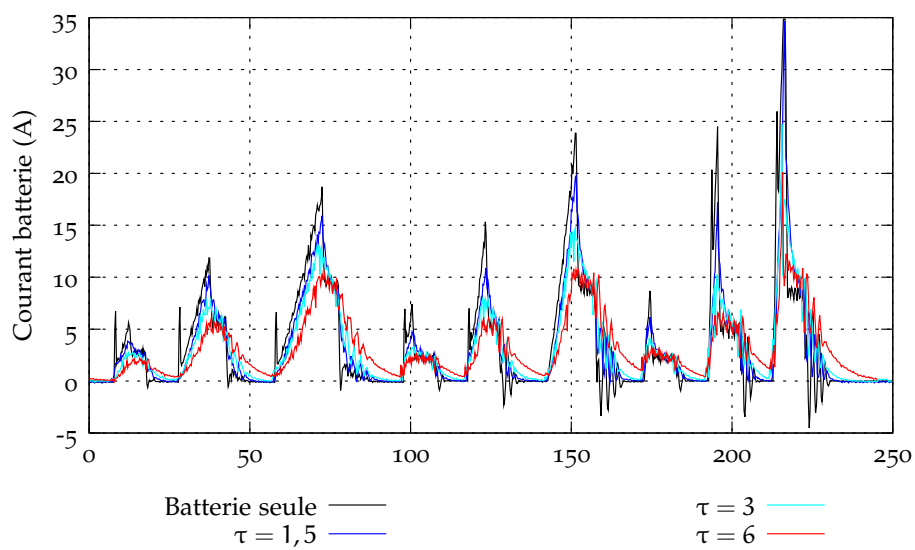


FIG. 84. Courant batterie pour différentes valeurs de  $\tau$

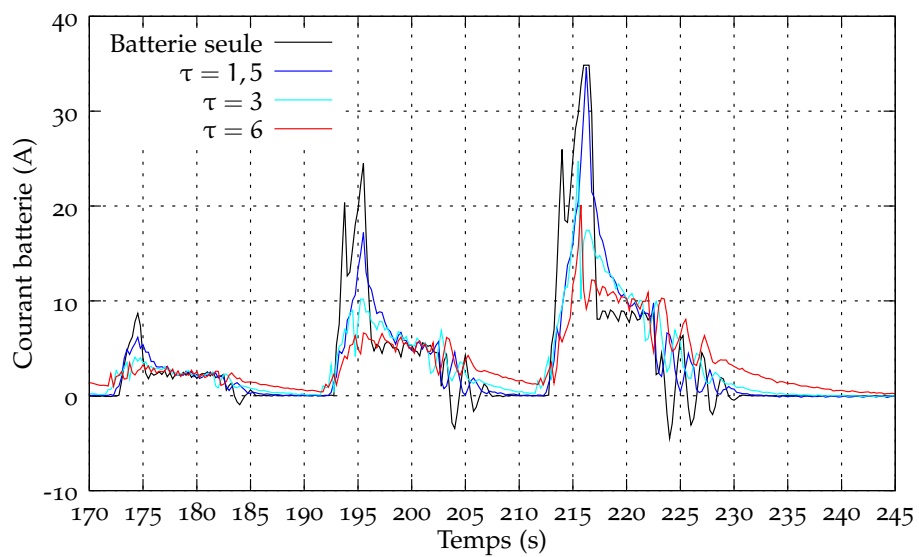
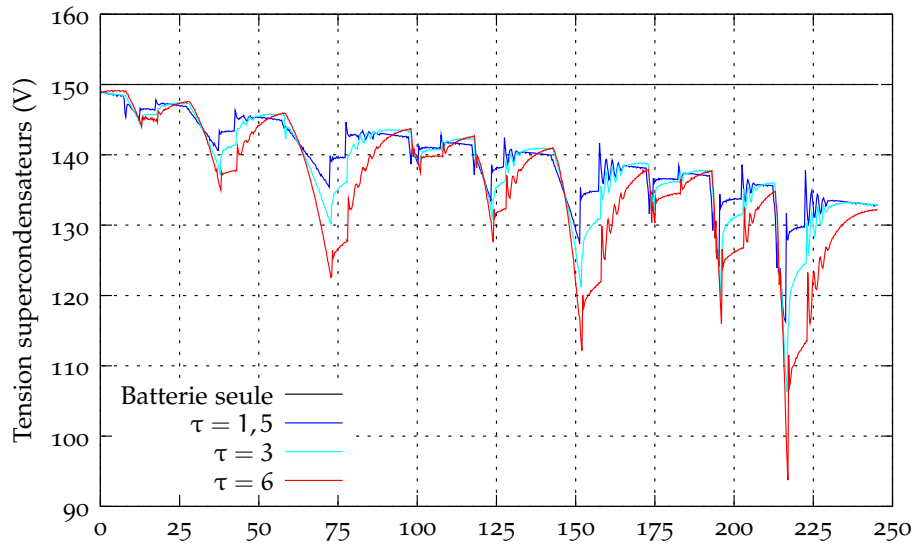
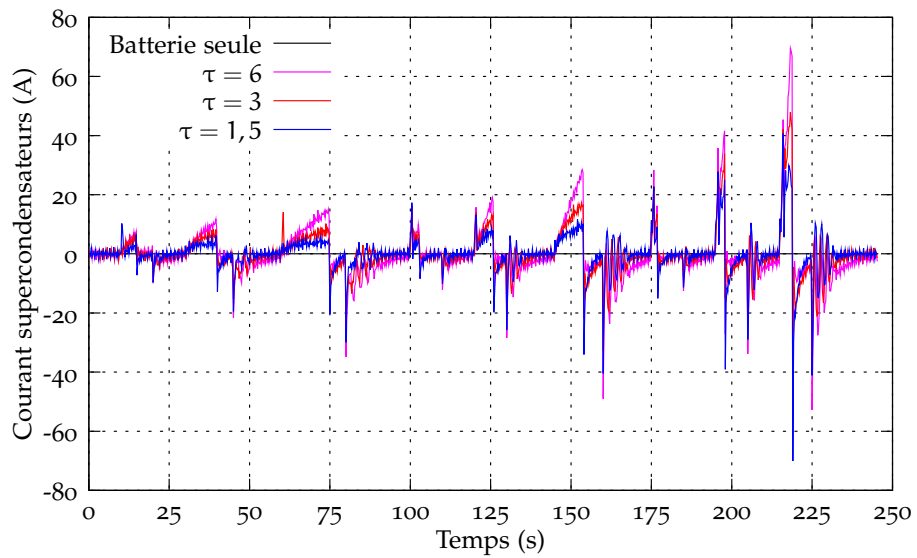


FIG. 85. Zoom sur le dernier cycle

FIG. 86. Tension du pack de supercondensateurs pour différentes valeur de  $\tau$ FIG. 87. Courant supercondensateurs pour différentes valeur de  $\tau$

#### 4.2.2 Cycle challenge SIA

Chaque année, les étudiants du département GESC de l'UTBM participent à une course mettant en compétition des véhicules construits par des élèves ingénieurs. L'UTBM est la seule école à présenter un véhicule électrique à cette compétition. Afin d'optimiser le véhicule, nous avons enregistré lors de la dernière édition, le profil de vitesse du véhicule lors de la course. Sur la figure 88, nous avons représenté trois tours de circuit. Nous avons choisi dans cette expérimentation de reproduire le cycle sur le banc de test afin de montrer l'intérêt d'utiliser des supercondensateurs dans cette application ou la dynamique du véhicule est le critère le plus important ; il s'agit d'une course !

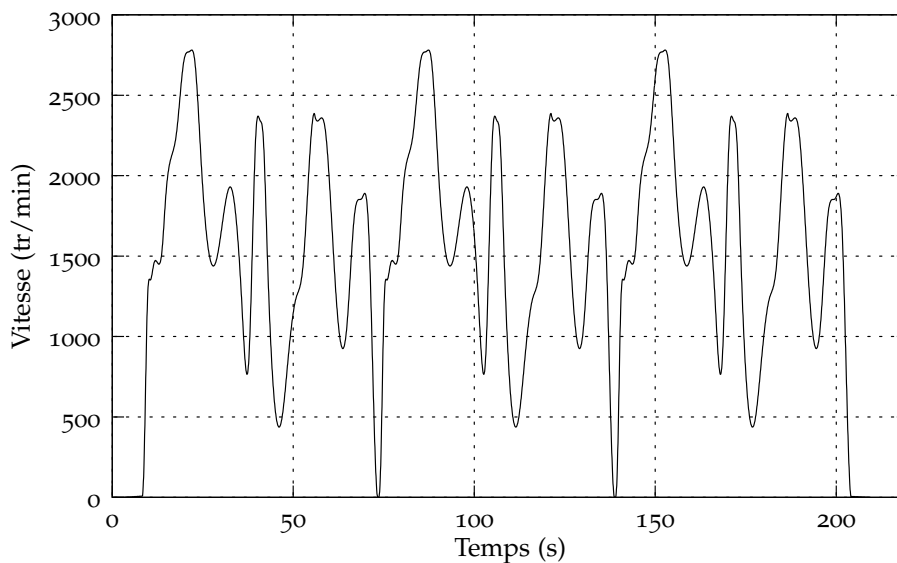


FIG. 88. Cycle de référence

Concernant la stratégie de contrôle des supercondensateurs, nous avons utilisé le même principe que celui utilisé dans le paragraphe précédent. Ici aussi nous avons testé plusieurs constantes de temps pour le filtre.

La figure 89 représente le courant de la batterie sans et avec supercondensateurs pour plusieurs constantes de temps. Dans le cas où la constante de temps est la plus élevée, on peut constater que la batterie fournit un courant moyen sur le cycle relativement constant. Ce cas de figure est idéal pour assurer une bonne autonomie du véhicule car la batterie n'est pas « stressée » par des pointes de courants et elle peut donc être dimensionnée au plus juste. De même, nous pouvons remarquer sur la figure que la dynamique de courant des supercondensateurs est beaucoup plus élevée pour les constantes de temps élevées.

Les figures 90 et 91 représentent les évolutions des tensions batteries et supercondensateurs pour les différentes constantes de temps. On peut remarquer une diminution de la tension supercondensateurs à la suite des trois cycles. En effet, le contrôle de la tension des supercondensateurs n'avait pas été implanté dans cet essai.

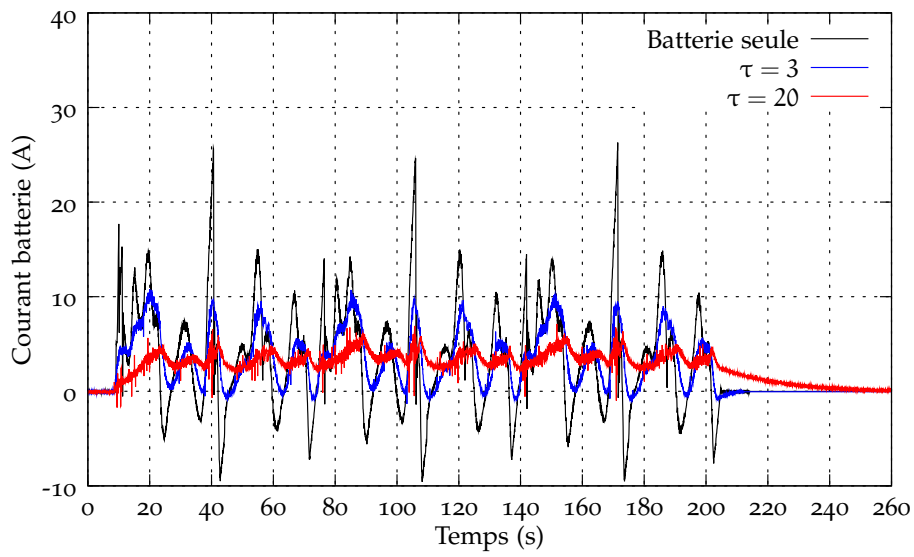


FIG. 89. Courant de la batterie

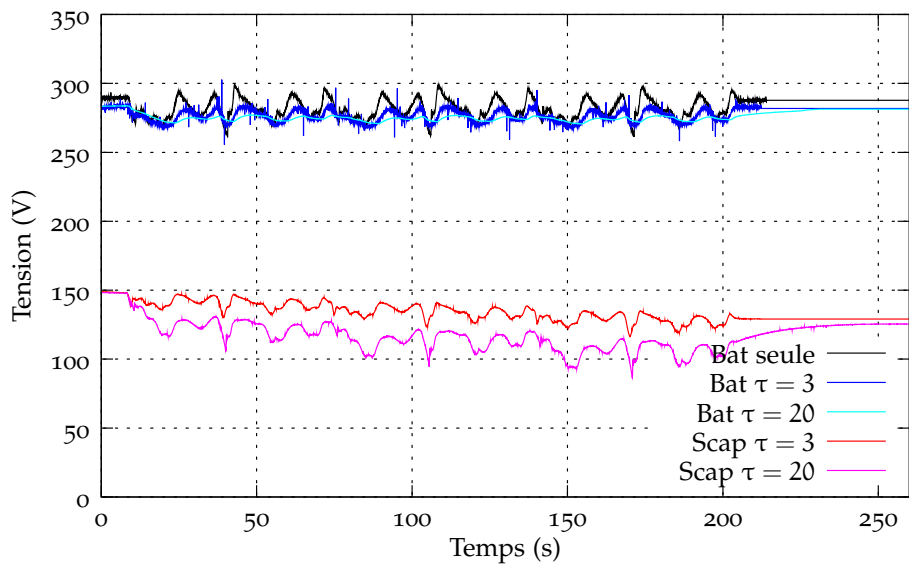


FIG. 90. Tensions batteries et supercondensateurs

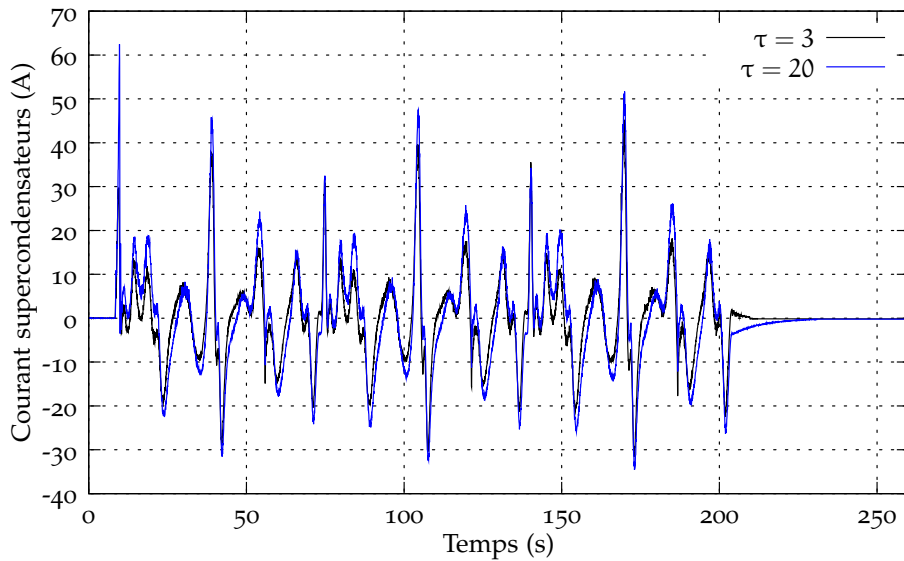


FIG. 91. Courant supercondensateurs

#### 4.2.3 Architecture hybride série

Dans cette partie, nous utilisons le cycle de référence présenté en figure 92. La dynamique est plus lente que le cycle précédent mais le couple de freinage exercé est plus important. Ce cycle se rapproche plus d'un cycle urbain.

##### *Alimentation directe de la charge par le groupe électrogène*

Dans ce cas de figure, nous souhaitons que le moteur diesel associé à sa génératrice fournisse directement l'énergie nécessaire à la traction. Comme l'illustre la figure 93, la consigne de courant du hacheur de sortie de l'alternateur est l'image du courant consommé par la charge. Nous avons simplement intercalé une fonction de saturation afin de ne pas dépasser le courant maximal débitable par le groupe électrogène. La batterie assurera tout de même les phases transitoires rapides ainsi que la récupération d'énergie au freinage.

La figure 94 montre la répartition de courant entre le bus continu (la charge), la batterie et le groupe électrogène vu du côté bus DC. Nous pouvons remarquer que la génératrice fournit quasiment tout le courant à la charge. La batterie intervient lors de petits phénomènes transitoires mais surtout en complément de courant lorsque la génératrice débite le courant maximal ( $t=75$  secondes) mais aussi lors des phases de freinages récupératifs ( $t=135$  secondes). Afin d'évaluer la consommation de carburant, nous avons mesuré avant le départ du cycle et à la fin de cycle (moteur thermique coupé) le poids du carburant dans le réservoir avec une balance avec une précision de 2 grammes. Le poids de carburant consommé était de 88 grammes.



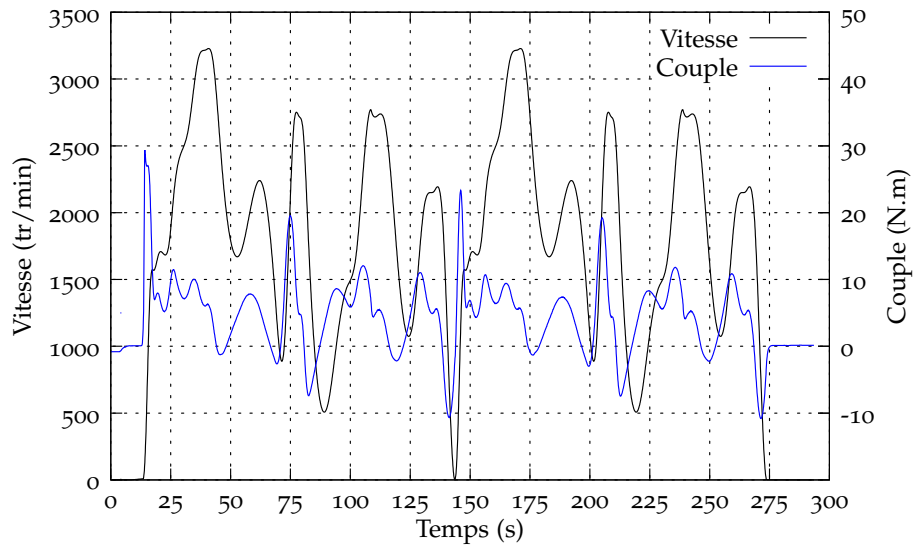


FIG. 92. Vitesse et couple du moteur de traction

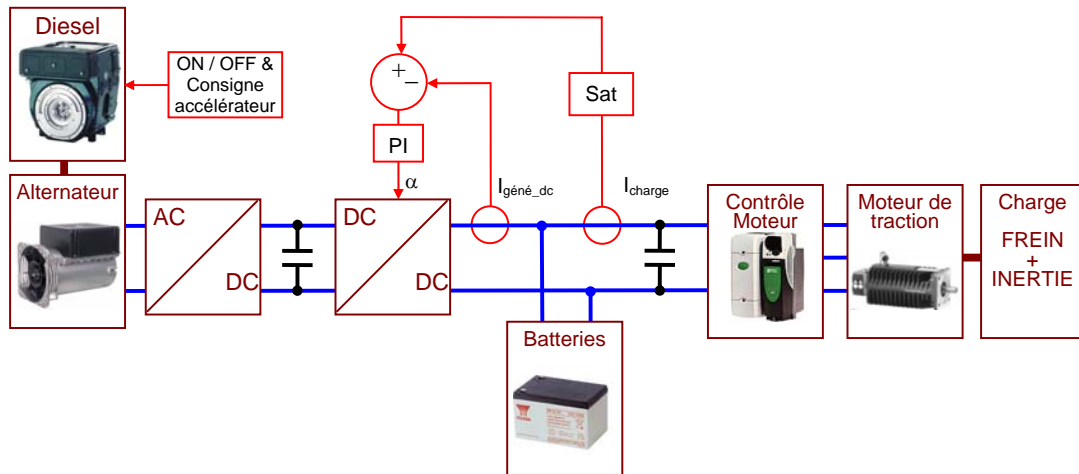


FIG. 93. Contrôle du générateur diesel - alimentation directe de la charge

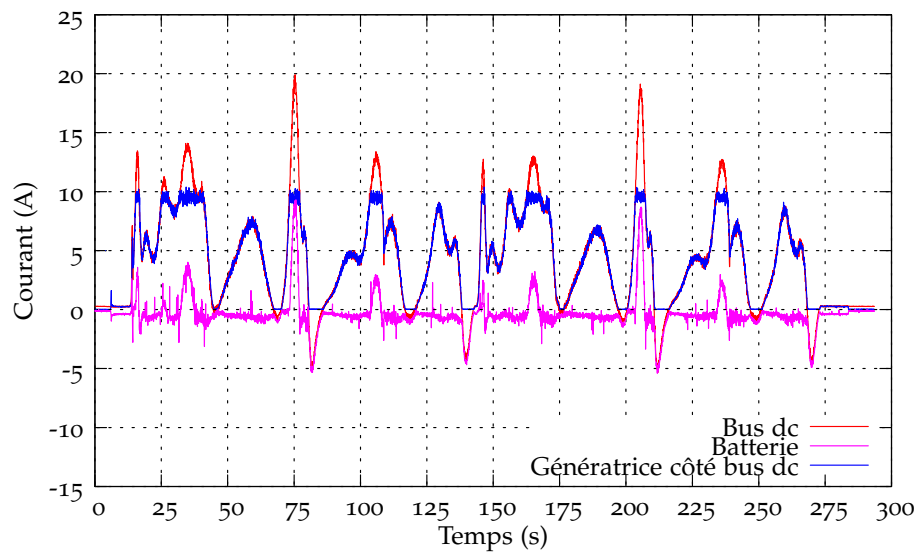


FIG. 94. Courant bus dc, batterie, et générateur côté bus dc

#### *Utilisation de la batterie en tampon*

Un des atouts des véhicules hybrides est de pouvoir diminuer la consommation de carburant par rapport aux véhicules conventionnels. En effet, les phases les plus gourmandes en énergies sont les phases transitoires où l'on demande de fortes puissances au moteur thermique. En lissant ces demandes de puissances à l'aide d'une source d'énergie tampon, il est possible de diminuer la consommation globale de carburant. C'est ce que nous avons voulu montrer dans cette expérience. La nouvelle stratégie de contrôle utilisée va permettre de solliciter un peu plus la batterie et moins le moteur thermique (figure 95). Nous avons inséré une fonction de transfert du premier ordre dans le but de filtrer la consigne de courant envoyée au convertisseur de puissance associé à la génératrice.

Les résultats de mesure mettent tout de suite en évidence le rôle joué maintenant par la batterie. En effet, sur la figure 96 nous pouvons constater que le courant de la génératrice est beaucoup moins tourmenté que celui vu précédemment en figure 94. La batterie fournit le complément de courant nécessaire et assure bien entendu toujours les phases de freinage récupératif. De plus, on peut remarquer que dans certaines phases, la génératrice recharge la batterie. La constante de temps du filtre a été fixée à 4 secondes. Le maintien de l'état de charge de la batterie a été pris en compte ici en ajoutant grossièrement au courant de consigne de la génératrice un courant de un ampère à fournir à la batterie. En utilisant cette stratégie de contrôle, le gain en consommation de carburant est notable. En utilisant la même méthode de pesée, nous obtenons une consommation de carburant de 72 grammes soit près de 18 % d'économie par rapport à l'expérience précédente.

#### *Association moteur thermique, batteries et supercondensateurs*

Nous proposons maintenant d'utiliser le pack de supercondensateurs du banc de test pour fournir ou absorber les pointes de puissance sur le cycle. En effet, comme nous

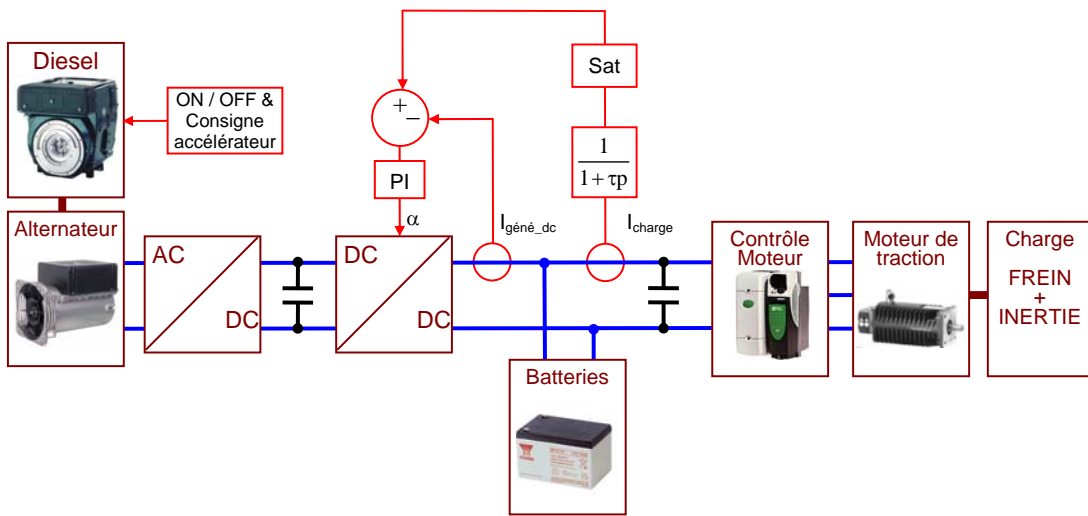


FIG. 95. Contrôle du système hybride batterie et générateur diesel

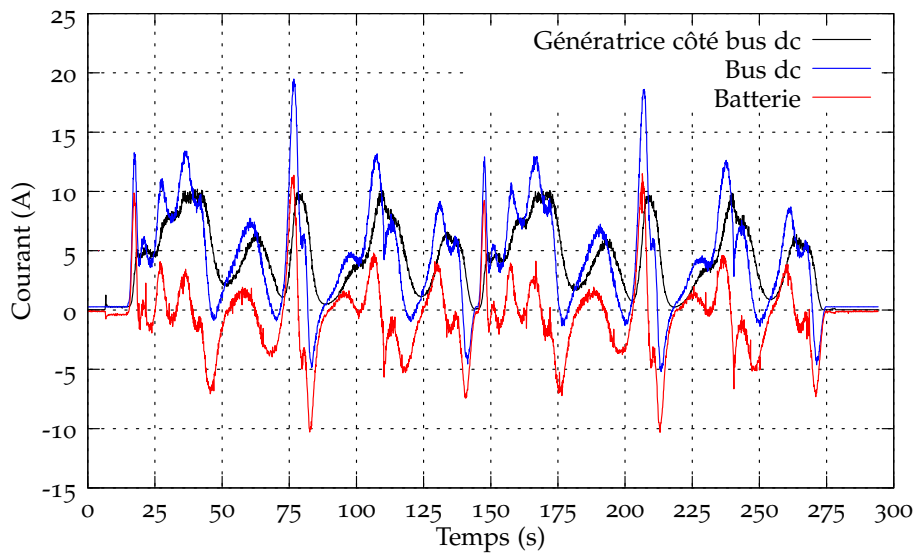


FIG. 96. Courant bus dc, batterie, et générateur côté bus dc

l'avons dit auparavant, les supercondensateurs sont les composants idéaux pour réaliser cette fonction. L'objectif maintenant est que la batterie ne fournisse aucun courant lors des phases transitoires tout en minimisant la consommation de carburant. La stratégie de contrôle utilisée est présentée en figure 97. Nous utilisons toujours une fonction de transfert du premier ordre afin contrôler le courant de consigne des supercondensateurs. La consigne de courant envoyée au hacheur de la génératrice est simplement la différence entre le courant consommé par la charge et le courant de consigne (côté dc) du hacheur associé aux supercondensateurs. La constante de temps du filtre a été fixée à 10 secondes.

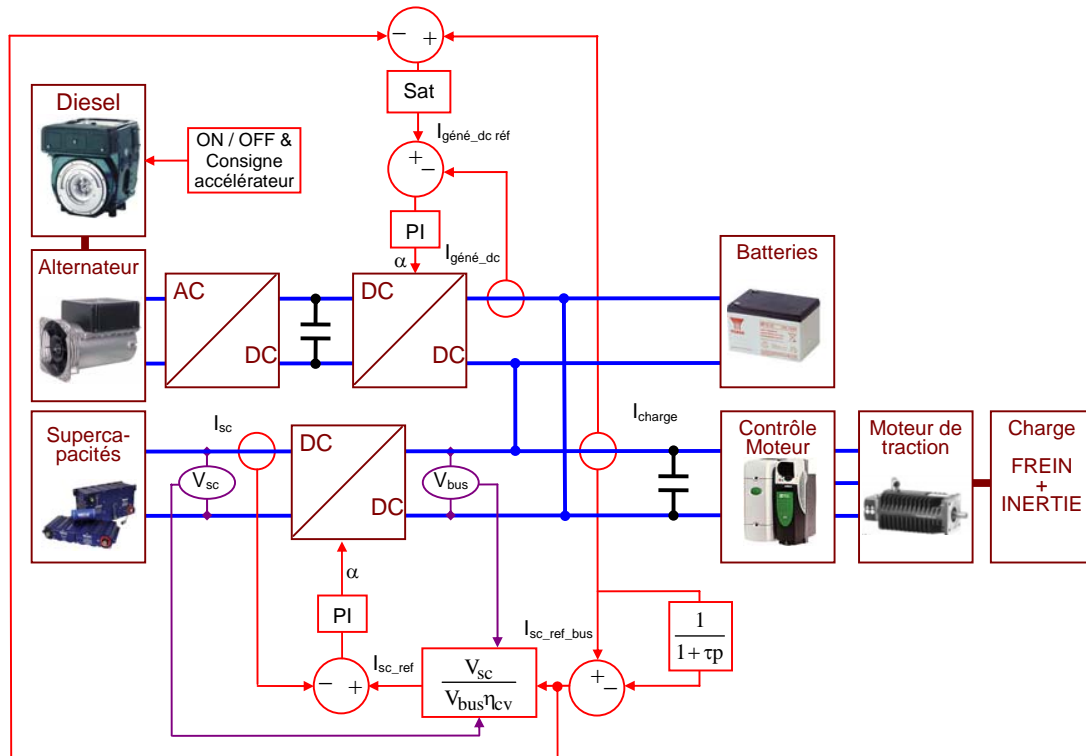


FIG. 97. Contrôle du système hybride batterie, générateur diesel et supercondensateurs

Les résultats de mesure (figure 98) montrent maintenant que le courant de batterie est quasiment nul sur le cycle. On remarque uniquement à la fin du cycle la recharge du pack de supercondensateurs par la batterie pour qu'il retrouve sa tension nominale. Cette phase reste bien entendu à optimiser afin d'asservir sur tout le cycle l'état de charge des supercondensateurs. D'autre part, le courant débité par la génératrice est beaucoup plus faible. On peut remarquer que le courant maximal n'est jamais atteint sur le cycle contrairement aux deux cas de figure précédents. D'un point de vue économie de carburant, nous avons mesuré une consommation de 74 grammes soit quasiment la même consommation que lors de l'hybridation avec la batterie (la balance a une précision de 2 grammes). Nous avons envisagé encore un gain de consommation mais il est vrai que les variations rapides de couple de charge étaient déjà bien atténuées avec l'utilisation

des batteries en tampon.

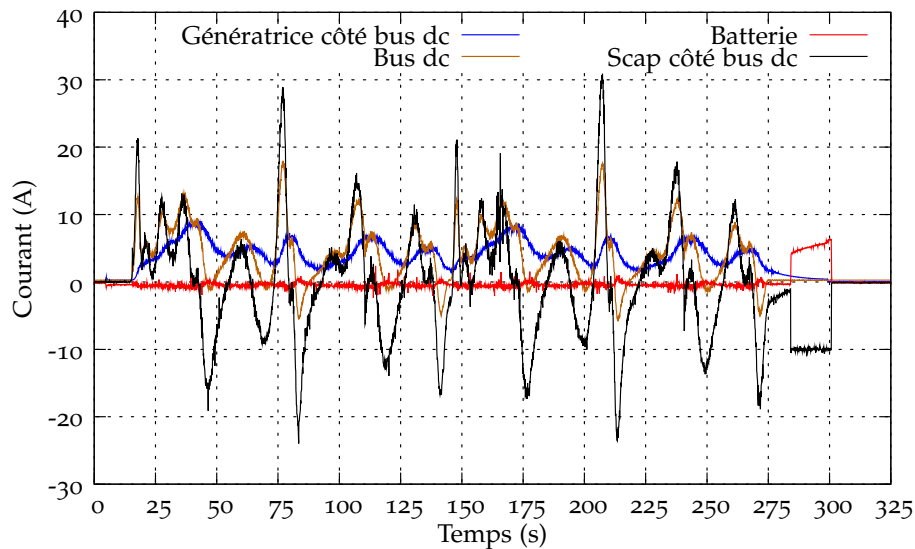


FIG. 98. Courant batterie, générateur côté bus dc et supercondensateurs côté bus dc

En s'intéressant à la tension des supercondensateurs (figure 99), nous pouvons constater que nous ne sommes pas descendu en dessous de la barre des 110 volts. Nous nous sommes fixés précédemment une tension minimale d'utilisation aux environs de 75 volts afin de conserver un rendement correct du hacheur. Nous pourrions donc encore améliorer la fourniture de puissance des supercondensateurs en augmentant encore la constante de temps du filtre.

#### 4.2.4 Simulation de l'architecture batteries, supercondensateurs et moteur thermique

Nous avons voulu valider les modèles numériques des différents éléments du banc d'essai, à savoir :

- le groupe électrogène composé du moteur thermique, de la génératrice et de son hacheur associé ;
- le moteur de traction couplé à sa charge mécanique ;
- le banc de supercondensateurs associé à son hacheur ;
- le pack de batteries.

Les simulations doivent permettre de valider aussi les lois de gestion d'énergie entre les différentes sources.

Le travail de simulation est grandement facilité par le fait que l'on utilise le même support logiciel pour le simulateur et pour le prototypage rapide (Matlab Simulink). Ceci engendre un gain de temps considérable car il est possible de passer de la simulation au prototypage et inversement quasi immédiatement. Nous avons donc rejoué en simulation les différents cycles sur les architectures vues précédemment.

Pour faciliter la lecture des courbes, nous avons désigné les configurations suivantes :

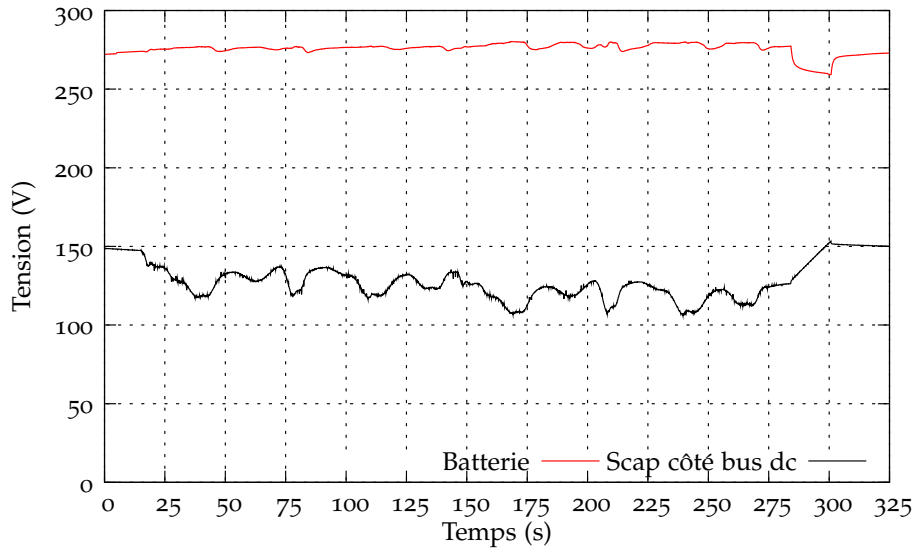


FIG. 99. Tension de la batterie et du pack de supercondensateurs

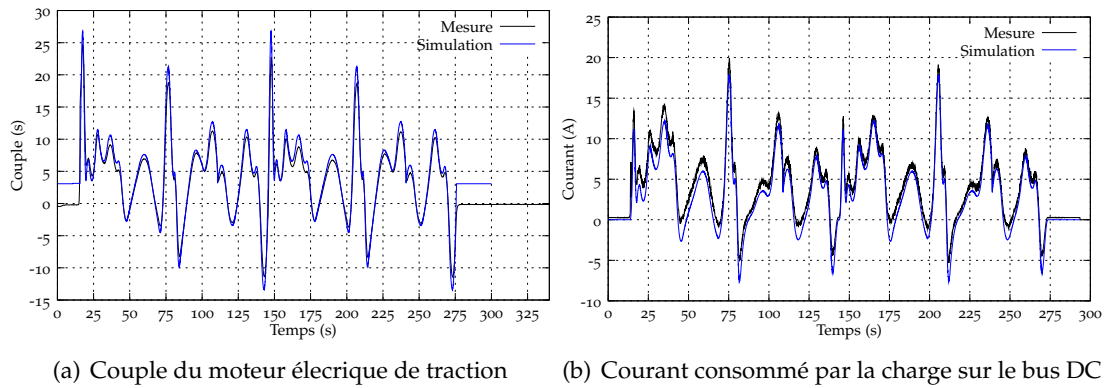


FIG. 100. Comparaison des grandeurs communes à toutes les architectures hybrides

- Config.1 : Alimentation directe de la charge par la génératrice ;
- Config.2 : Hybridation de la génératrice par la batterie ;
- Config.3 : Hybridation de la génératrice par les supercondensateurs et la batterie.

Nous pouvons constater à la vue de ces résultats que les modèles développés sont proches de la réalité. Les courbes représentant le couple du moteur électrique ainsi que le courant du bus continu montrent que les modèles utilisés sont réalistes (figure 100). Les courbes liées aux supercondensateurs montrent que leur comportement en simulation est similaire à la pratique. L'évolution de la tension du pack sur le cycle en est un bon indicateur (figure 103 (c)).

De même les lois de gestion d'énergie fonctionnent aussi correctement et donnent les réponses attendues.

Concernant les batteries, les résultats sont bons pour les courants (figure 102 (a), (c) et (e)) mais plus mitigés concernant l'évolution de la tension de la batterie (figure 102 (b), (d) et (f)). Cela corrobore les constatations faites dans le chapitre 3 quant à la validité du modèle de Peukert pour les batteries au plomb à électrolyte gélifié (capacité de double couche élevée).

Pour terminer, l'ensemble groupe électrogène composé du moteur thermique, de la génératrice et du hacheur associé fonctionne correctement. Quelques approximations sont encore présentes sur les courbes de couple mécanique du moteur thermique (figures 101 (a), (c) et (e)) mais les allures sont correctes. Il en est de même pour les courants débités par le hacheur de la génératrice (figures 101 (b), (d) et (f)).

Pour achever cette étude expérimentale, nous avons voulu vérifier les gains en consommation par la simulation :

- dans le premier cas de figure (pas d'hybridation), nous trouvons une consommation de 74 grammes de carburant comparés aux 88 grammes mesurés sur le banc ;
- avec l'hybridation avec batterie, nous avons obtenus 68 grammes en simulation comparés aux 72 grammes en pratique ;
- avec l'hybridation avec les supercondensateurs et la batterie, nous avons simulé une consommation de 64 grammes contre 74 grammes mesurés sur le banc.

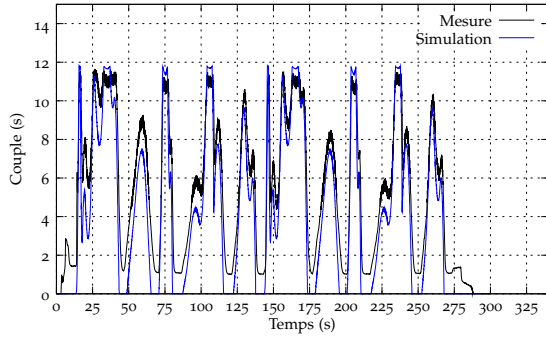
On remarque immédiatement que le gain en consommation grâce à l'hybridation est bien présent mais de façon moins prononcé qu'en pratique. Il est vrai que le modèle du moteur thermique utilisé (basé sur l'approximation de Willans) est plus un modèle statique que dynamique. Cela explique l'écart de consommation dans le premier cas de figure.

#### 4.2.5 Conclusion

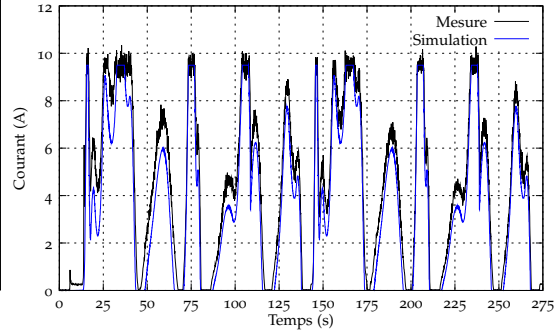
Nous avons vu dans cette dernière partie la simulation et l'expérimentation de plusieurs architectures hybrides. Les différents résultats présentés ont permis de valider dans un premier temps le bon fonctionnement du banc d'essai. D'autre part plusieurs stratégies de contrôle ont été testées avec succès.

Les essais ont mis en évidence les avantages et inconvénients des différentes structures hybrides étudiées conformément à ce que les résultats de simulation avaient prédit.

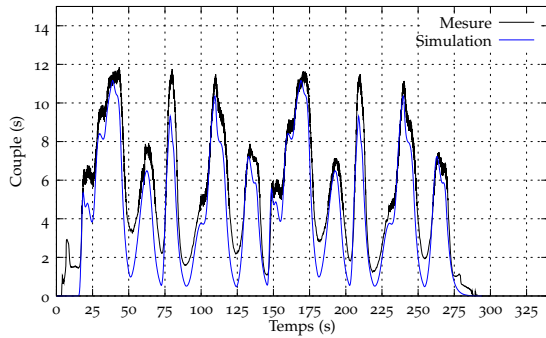
Enfin de nombreuses configurations restent encore à évaluer et notamment les architectures parallèles. De même de nouvelles stratégies de gestion de l'énergie pourront être testées en utilisant les travaux récents de nos collègues automaticiens du laboratoire.



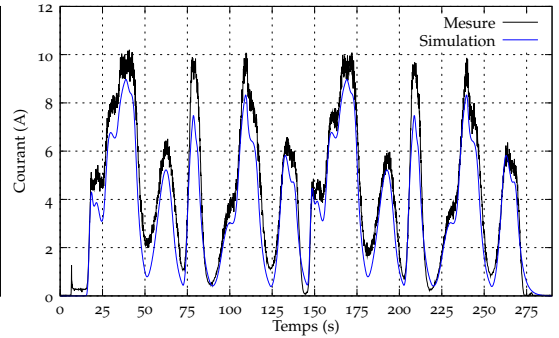
(a) Couple du moteur thermique - config.1



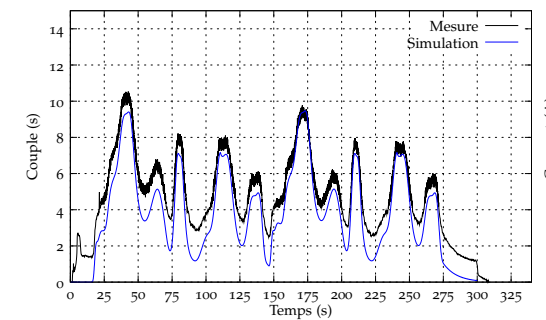
(b) Courant débité par la génératrice côté bus DC - config.1



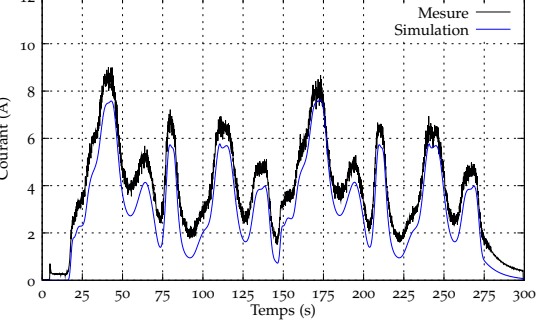
(c) Couple du moteur thermique - config.2



(d) Courant débité par la génératrice côté bus DC - config.2



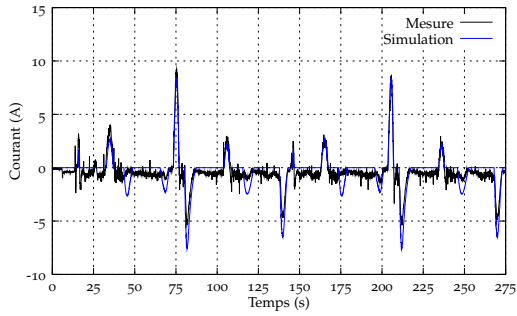
(e) Couple du moteur thermique - config.3



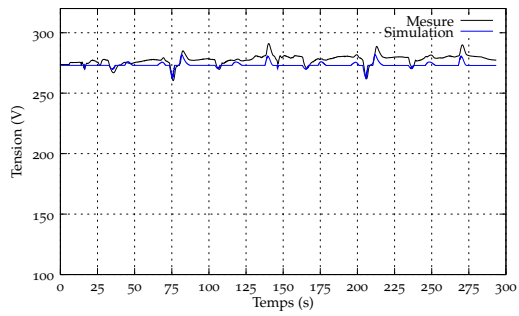
(f) Courant débité par la génératrice côté bus DC - config.3

FIG. 101. Comparaion du couple du moteur thermique et du courant de la génératrice pour les trois architectures

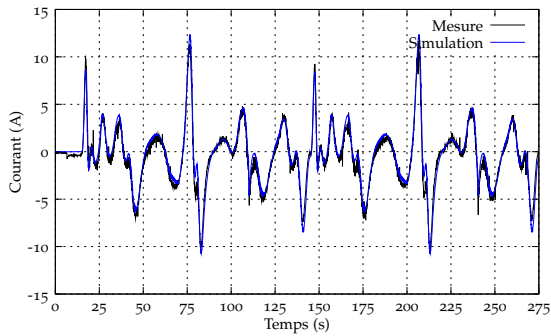




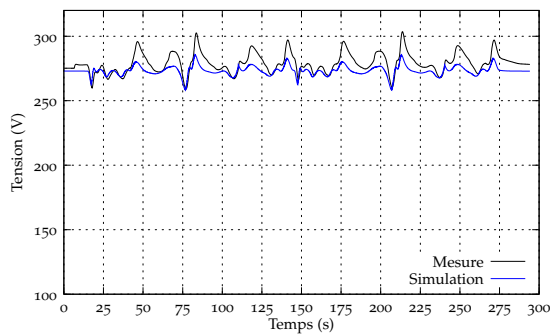
(a) Courant batterie - config.1



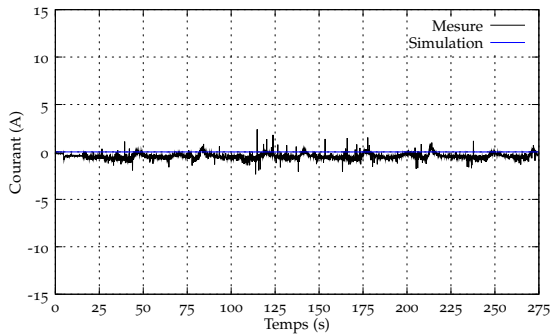
(b) Tension batterie - config.1



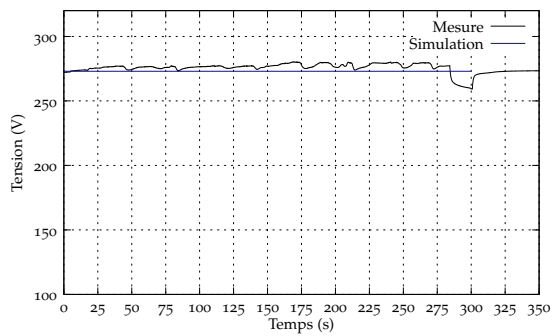
(c) Courant batterie - config.2



(d) Tension batterie - config.2

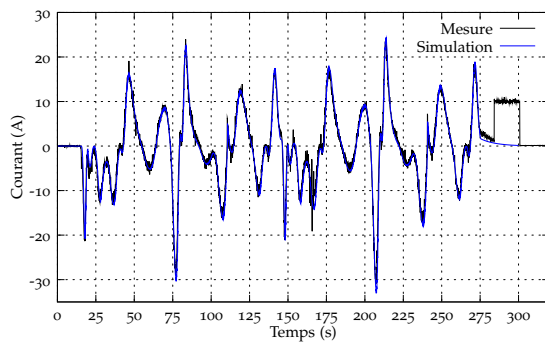


(e) Courant batterie - config.3

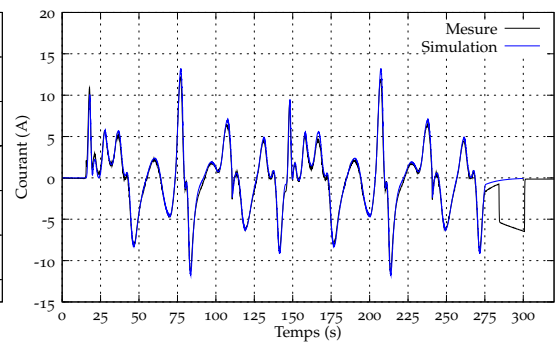


(f) Tension batterie - config.3

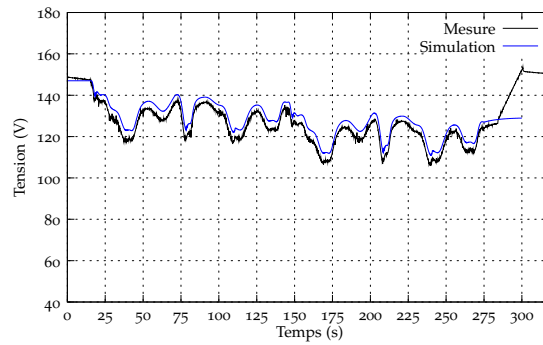
FIG. 102. Comparaison du courant et de la tension batterie



(a) Courant Scap - config.3



(b) Courant Scap bus DC - config.3



(c) Tension Scap - config.3

FIG. 103. Comparaison des grandeurs liées aux supercondensateurs

## CONCLUSION GÉNÉRALE

---

Ce mémoire de thèse a montré l'intérêt d'utiliser des architectures hybrides dans les applications automobiles. Nous avons mis l'accent dans le premier chapitre sur la problématique environnementale liée aux véhicules à combustion interne. Nous avons fait un bilan des différentes architectures hybrides étudiées actuellement par les constructeurs automobiles. Il a été montré que le développement des solutions hybrides et électriques pour les véhicules passera inexorablement par des progrès importants à réaliser dans le domaine du stockage énergétique et en particulier celui des accumulateurs électrochimiques. Certes, beaucoup de démonstrateurs existent avec des solutions techniques innovantes mais sans réalité commerciale dans les années à venir : le véhicule à pile à combustible en est un exemple.

Dans un objectif de contribuer à l'essor des solutions hybrides et électriques dans le domaine du transport terrestre, le laboratoire SeT de l'UTBM travaille activement sur le développement de sa plate-forme de prototypage virtuelle destinée à la conception, l'évaluation et aux tests des solutions avant leur réalisations. Les travaux présentés dans ce document ont contribué à alimenter cette plateforme en modèles de composants et de systèmes. Nous avons vu qu'il était nécessaire de connecter cette plate-forme numérique avec des outils réels permettant d'une part de caractériser les composants, mais également de valider des systèmes complets avec leurs lois de commande et de gestion de l'énergie.

Dans le chapitre 2 nous avons présenté le dimensionnement et la réalisation de deux équipements de test développés dans le cadre de cette thèse. Tout d'abord, un fauteuil roulant hybride à pile à combustible a été conçu et mis en place. L'objectif principal était de disposer d'un outil de développement à moyenne échelle utilisant la technologie des piles à combustible. En parallèle, nous avons choisi de concevoir un banc d'essai d'architectures hybrides, à échelle réduite (1/4) représentatif du comportement d'un véhicule urbain. Ce banc a été entièrement imaginé, conçu, développé et réalisé au sein du laboratoire. Sa grande modularité en fait un outil expérimental extrêmement intéressant permettant de tester une multitude de structures hybrides.

Le troisième chapitre a été dédié à la présentation des méthodes de modélisation utilisées pour les différents équipements des deux bancs de test. L'intérêt ici était de concevoir des modèles destinés à faire de la gestion d'énergie. Motivé par un souci d'efficacité nous n'avons pas cherché à développer des modèles extrêmement fins. Nous avons plutôt choisi d'utiliser des méthodes de modélisation pragmatiques en ce basant par exemple sur l'approximation de Willans.

Le travail de modélisation a pu être validé par de nombreuses expérimentations. Le chapitre 4 en montre un condensé. Grâce aux résultats apportés par les expériences menées sur les deux bancs d'essais (Fauteuil roulant et banc hybride), nous avons pu, d'une part, valider notre méthode de conception des systèmes hybrides. D'autre part plusieurs configurations d'hybridation et de lois de gestion d'énergie ont été mises au point et validées avec succès. Enfin la confrontation des résultats de simulation et d'expérimenta-

tion ont permis de confirmer l'ensemble de notre démarche.

Les travaux présentés dans ce mémoire confortent ainsi la démarche de travail menée au laboratoire. En effet la combinaison d'une plateforme numérique riche en modèles de composants multi physiques et de moyens d'essais originaux et performants fait que nous pourrions rapidement progresser dans le développement de solutions innovantes pour le transport terrestre.

En ce qui concerne les perspectives, elles sont nombreuses. Nous en citons quelques unes qui nous semblent réalisables à court et moyen terme :

- enrichir la plate-forme numérique par des modèles plus fins des composants d'une chaîne de traction pour tenir compte des effets de phénomènes physiques tels que la thermique, la mécanique (vibrations, ...) mais également la durée de vie, ...
- élargir les possibilités HIL du banc hybride afin de pouvoir caractériser et/ou valider les modèles de tous les éléments d'un véhicule électrique ou hybride

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] Air emission sources - nitrogen oxides. (Cité pages ix et 6.)
- [2] P BARRADE et A RUFER : High-power fast energy exchange between storage systems : Supercapacitors as energy buffer in transportation systems. *EVS*, 2001. (Cité page 70.)
- [3] Philippe BARRADE et Alfred RUFER : Current capability and power density of supercapacitors : Considerations on energy efficiency. Publication, Laboratoire d'Électronique Industrielle (LEI), 2003. [http : //leiwww.epfl.ch](http://leiwww.epfl.ch). (Cité pages 70 et 73.)
- [4] F. BELHACHEMI : *Modélisation et caractérisation des supercondensateurs à double couche électrique utilisés en électronique de puissance*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2001. (Cité pages 90, 91 et 92.)
- [5] Benjamin BLUNIER et Abdellatif MIRAOUÏ : Optimization and air supply management of a polymer electrolyte fuel cell. In *IEEE Vehicular Power and Propulsion (VPP), 2005 IEEE Conference*, page 7pp., sep 2005. (Cité page 97.)
- [6] Benjamin BLUNIER et Abdellatif MIRAOUÏ : Modelling of fuel cells using multi-domain vhdl-ams language. *Journal of Power Sources*, 177(2):434–450, 2007. (Cité page 97.)
- [7] Benjamin BLUNIER et Abdellatif MIRAOUÏ : *Piles à combustible, Principe, modélisation et applications avec exercices et problèmes corrigés*. Technosup. 2007. Livre en français. (Cité pages x, 36 et 109.)
- [8] D BOUQUAIN, B BLUNIER et A. MIRAOUÏ : A hybrid fuel cell/battery wheelchair - modeling, simulation and experimentation. In *Vehicle Power and Propulsion (VPP), IEEE Conference, Chine*, 2008. (Cité page 55.)
- [9] D BOUQUAIN, K EL KADRI, Y AIT AMIRAT et JM KAUFFMANN : Power management on an experimental series hybrid vehicle. In *IEEE Vehicular and Power Propulsion Conference*, 2004. (Cité page 26.)
- [10] S CATANIA : Les véhicules particuliers en france : données et références. Rapport technique, ADEME, 2002. (Cité page 1.)
- [11] D CHAPUIS : Psa's diesel hybrid electric vehicle. *EVS*, 2003. (Cité page 34.)
- [12] A DJERDIR, D BOUQUAIN, A GUALOUS et A BERTHON : Managing ultracapacitors energy to feed electric vehicles dc bus. In *EPE*, 2001. (Cité page 50.)
- [13] Mehrdad EHSANI, Yimin GAO, Sebastien E. GAY et Ali EMADI : *Modern Electric Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles, Fundamentals, Theory, and Design*. CRC Press, 2005. (Cité page 83.)

- [14] E FAGGIOLI, P RENA, V DANIEL, Z ANDRIEU, R MALLANT et KAHLEN : Ultracapacitors for the energy management of electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 1999. (Cité page 50.)
- [15] R FRANCK et ASSOCIATES : The balance of power. *Automotive Engineering International*, 2003. (Cité page 62.)
- [16] GIEC : Rapport du giec 2007. 2007. URL <http://www.ipcc.ch/pdf/>. (Cité pages ix, 9 et 10.)
- [17] H GUALOUS et R GALLAY : Applications des supercondensateurs. *Techniques de l'Ingénieur*, page D 3 335, 2008. (Cité pages x et 52.)
- [18] Lino GUZZELLA et Christopher H. ONDER : *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*. Springer, 2004. (Cité pages xii, 83 et 85.)
- [19] Lino GUZZELLA et Antonio SCIARRETTA : *Vehicle Propulsion Systems, Introduction to modeling and optimization*. Springer, 1 édition, 2005. (Cité pages 83, 84 et 99.)
- [20] R KNORR, A SCHWAKE, M SORIA, M REIMERINK, D MACERATA et M ULLRICH : Supercar - improved energy supply for the integrated starter generator with double layer capacitor and energy battery for cars with 42v. In *ELE-DRIVE*, 2004. (Cité page 12.)
- [21] James LARMINIE et John LOWRY : *Electric Vehicle Technology Explained*. John Wiley and Sons, Ltd, 2003. (Cité pages xii, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 95 et 96.)
- [22] F LAURENCELLE, R CHAHINE, J HAMELIN, K AGBOSSOU, M FOURNIER, T K BOSE et A LAPERRIÈRE : Characterization of a ballard MK5-E proton exchange membrane fuel cell stack. In *Fuel Cells*, numéro 1, pages 66–71, 2001. (Cité page 109.)
- [23] Sebastien E. Gay et Ali Emadi MEHRDAD EHSANI, Yimin Gao : *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*. CRC PRESS, 2005. (Cité pages xii, 10 et 12.)
- [24] METOFFICE.GOV.UK : Great smog, londres 1952. (Cité pages ix et 7.)
- [25] I MOMAS, JF CAILLARD et B LESAFFRE : Rapport de la commission d'orientation du plan national santé environnement. Rapport technique, AFSSE, 2004. (Cité page 7.)
- [26] K. J. PATTON et J. B. NITSCHKE, R. G. and Heywood : Development and evaluation of a friction model for spark ignition engine. In *Society of Automotive Engineers international congress and exposition*, numéro 890836, page 21 p, Detroit, MI (USA), 27 Feb – 3 Mar 1989. Society of Automotive Engineers. (Cité page 85.)
- [27] C PLASSE, M CHEMIN, G LACAMOIRE et E VON WESTERHOLT : L'alternodémarrage, du stop and go au groupe motopropulseur hybride. *Société des Ingénieurs de l'Automobile*, 2001. (Cité pages ix et 24.)
- [28] EPA Dynamometer Driving SCHEDULES : Cycles routiers. URL <http://www.epa.gov/nvfel/testing/dynamometer.htm>. (Cité pages ix, 14, 15 et 16.)

- [29] TM4 : Tm4 drive train systèmes. Rapport technique, TM4, 2008. (Cité pages x et 31.)
- [30] C. WANG, M.H. NEHRIR et H. GAO : Control of pem fuel cell distributed generation systems. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 21(2):586–595, jun 2006. (Cité page 56.)
- [31] Michael H. WESTBROOK : *The Electric Car Development and future of battery, hybrid and fuel-cell cars*. The Institution of Electrical Engineers, 2001. (Cité page 20.)
- [32] J YAMAGUCHI et K JOST : Toyota prius : aei best engineered vehicle 2004, 2004. (Cité page 34.)